

**СУЧАСНІ МЕТОДИ
КООРДИНАТНИХ ВИМІРЮВАНЬ
В АВІА- ТА РАКЕТОБУДУВАННІ**

2019

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

**СУЧАСНІ МЕТОДИ
КООРДИНАТНИХ ВИМІРЮВАНЬ
В АВІА- ТА РАКЕТОБУДУВАННІ**

Навчальний посібник

Харків «ХАІ» 2019

УДК 629.7.002:681.786.08:004.922(075.8)
С 91

Колектив авторів:

І. В. Бичков, К. В. Майорова,
І. О. Воронько, С. Ю. Миронова,
Ю. В. Д'яченко, О. В. Романцов,
А. С. Морголенко, Г. С. Селезньова

Рецензенти: д-р техн. наук, проф. С. А. Бичков,
д-р техн. наук, проф. О. В. Мамлюк

С 91 Бичков, І. В.

Сучасні методи координатних вимірювань в авіа- та ракетобудуванні [Електронний ресурс]: навч. посіб. / І. В. Бичков, К. В. Майорова, І. О. Воронько, С. Ю. Миронова, Ю. В. Д'яченко, О. В. Романцов, А. С. Морголенко, Г. С. Селезньова. – Харків: Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2019. – 96 с.

Посібник орієнтовано на студентів спеціальності 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка», які вивчають дисципліни, пов'язані з літако- і вертольотобудуванням, виробництвом літальних апаратів, а також із системами автоматизованого проектування.

Подано основні стандартизовані терміни та поняття, розглянуто координатно-вимірювальні машини та їх застосування.

Наведено основні етапи виконання координатних вимірювань та реінжинірингу промислових виробів авіаційної техніки, викладено особливості розроблення комп'ютерної моделі прототипу виробу.

Описано монтаж складальної оснастки та позиціонування великогабаритних панелей при стапельному складанні, роботизацію складальних процесів, технологію автоматичного стикування агрегатів на базі лазерного трекара.

Іл. 88. Табл. 9. Бібліогр.: 14 назв

УДК 629.7.002:681.786.08:004.922(075.8)

© Авторський колектив, 2019

© Національний аерокосмічний
університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», 2019

ВСТУП

Розвиток сучасного машинобудування, підвищення його технічного рівня нерозривно пов'язані з досягненнями науки й техніки, автоматизацією виробництва та супроводжуються інтенсивним розвитком і вдосконаленням засобів контролю та керування технологічними процесами.

Комп'ютеризація інженерних завдань – один із основних шляхів підвищення конкурентоспроможності продукції будь-якого машинобудівного підприємства незалежно від типу виробництва.

Виготовлення взаємозамінних виробів і відповідність їх вимогам технічної документації є можливими при високому рівні метрологічного забезпечення виробництва та здійсненні відповідного технічного контролю. З усіх видів контролю найбільш інформативним і об'єктивним є контроль з використанням засобів вимірювальної техніки. Собівартість контролю в окремих галузях машинобудування може становити 25 ... 30% від собівартості виробів.

Основні завдання метрологічної служби підприємств авіаційного та ракетно-космічного профілю:

1. Забезпечення належного стану заходів і вимірювальних приладів, що застосовують на підприємстві.
2. Систематичне вивчення експлуатаційних якостей вимірювальної апаратури, встановлення надійності її роботи й оптимальних термінів періодичної перевірки.
3. Проведення нагляду за станом і правильним застосуванням вимірювальної та випробувальної техніки, за дотриманням встановлених методів вимірювання та випробувань в усіх підрозділах підприємства.
4. Активна участь у питаннях вибору та призначенні засобів вимірювань, активна політика в області автоматизації вимірювань і розроблення, випробувань і впровадження нової прогресивної вимірювальної техніки, пов'язаної з подальшим підйомом технічного рівня підприємства й підвищення якості продукції, що випускається.

Для остаточного контролю геометричних параметрів великогабаритних деталей та оснастки на провідних підприємствах аерокосмічної галузі України – ДП «АНТОНОВ», ПАТ «Мотор Січ», ДП «Південний машинобудівний завод ім. Макарова» та багатьох інших застосовують контрольно-вимірювальні машини, лазерні трекери та лазерні сканери, що укомплектовані комп'ютерами, для керування процесом контролю й оброблення результатів вимірювань.

1 ОСНОВНІ ТЕРМІНИ В ГАЛУЗІ МЕТРОЛОГІЇ

Метрологія – наука про вимірювання, методи й засоби забезпечення їх єдності та способи досягнення потрібної точності.

Вимірювання – знаходження значень фізичних величин експериментальним шляхом.

Фізична величина – будь-яка властивість матеріального об'єкта, яку можна кількісно визначити.

Єдність вимірювань – такий стан вимірювань, коли фізичні величини виражені в узаконених одиницях, а значення їх похибок відомі із заданою ймовірністю.

Метрологію поділяють на теоретичну, прикладну й законодавчу.

Теоретична вирішує загальні наукові проблеми вимірювань.

Предметом прикладної метрології є практичне застосування положень теоретичної метрології.

Законодавча метрологія полягає у встановленні та контролі за дотриманням спеціальних вимог і правил для забезпечення єдності й потрібної точності вимірювань.

Названі три розділи є взаємозв'язаними та мають на меті вирішення ряду завдань, найважливішими серед яких є такі:

- опрацювання загальної теорії вимірювань;
- розроблення теорії певних окремих видів вимірювань;
- розроблення теорії похибок;
- визначення фізичних констант і стандартних довідкових даних про властивості речовин і матеріалів;
- розроблення еталонів і стандартних зразків;
- розроблення засобів вимірювання;
- забезпечення правильної експлуатації засобів вимірювальної техніки;
- відтворення розмірів одиниць за допомогою еталонів і передавання їх усім іншим засобам вимірювання;
- нормування метрологічних характеристик засобів вимірювання;
- нормування стандартних вимірювальних процесів і методик виконання вимірювань;
- метрологічний нагляд за засобами вимірювання та правильністю їх застосування.

Порівнюючи окремі завдання, можна розрізнити, які з них більше чи менше відповідають окремим трьом розділам метрології, але ніколи їх не можна віднести тільки до одного з них.

Однак треба зазначити, що функції прикладної і законодавчої метрологій завжди підпорядковані положенням теоретичної. У свою чергу, положення теоретичної метрології знаходять практичну перевірку при реалізації функцій прикладної та законодавчої метрологій.

1.1 Характеристика найбільш уживаних із стандартизованих термінів

Метрологія оперує рядом термінів, що встановлені ДСТУ 2681-94 «Метрологія. Терміни та визначення».

Цей стандарт установлює обов'язкові для використання терміни у всіх видах нормативної документації, науково-технічній, навчально-методичній літературі, що належить до метрології та метрологічного забезпечення, а також робіт зі стандартизації або при використанні результатів цих робіт.

Наведемо характеристику найбільш уживаних із стандартизованих термінів.

Фізична величина – властивість, спільна в якісному відношенні для багатьох матеріальних об'єктів та індивідуальна в кількісному відношенні для кожного з них.

Розмір фізичної величини – кількісний вміст фізичної величини в даному об'єкті.

Значення фізичної величини – відображення фізичної величини у вигляді числового значення величини із позначенням її одиниці.

Розмірність фізичної величини – вираз, що відображає зв'язок величини з основними величинами системи.

Числове значення фізичної величини – число, яке дорівнює відношенню розміру фізичної величини, що вимірюється, до розміру одиниці цієї фізичної величини чи кратної одиниці.

Вимірювання – відображення вимірюваних величин їх значеннями шляхом експерименту й обчислень за допомогою спеціальних технічних засобів.

Пряме вимірювання – вимірювання однієї величини, значення якої знаходять безпосередньо без перетворення її роду та використання відомих залежностей.

Непряме вимірювання – вимірювання, в якому значення однієї чи кількох вимірюваних величин знаходять після перетворення ряду величин чи обчислення за відомими залежностями їх від декількох величин аргументів, що вимірюють прямо.

Опосередковане вимірювання – непряме вимірювання однієї величини з перетворенням її роду чи обчисленнями за результатами вимірювань інших величин, з якими вимірювана величина пов'язана явною функціональною залежністю.

Абсолютна похибка вимірювання – різниця між результатом вимірювання та умовно істинним значенням вимірюваної величини.

Відносна похибка – відношення абсолютної похибки вимірювання до умовно істинного значення вимірюваної величини.

Систематична похибка вимірювання – складова похибки, що залишається сталою або прогнозовано змінюється в ряді вимірювань тієї самої величини.

Випадкова похибка вимірювання – складова похибки, що непрогнозовано змінюється в ряді вимірювань тієї самої величини.

Точність вимірювання – головна характеристика якості вимірювання, що відображає близькість результату вимірювання до істинного значення вимірюваної величини.

Засіб вимірювальної техніки – технічний засіб, що застосовується під час вимірювань і має нормовані метрологічні характеристики.

Вимірювальний прилад – засіб вимірювань, в якому створюється візуальний сигнал вимірювальної інформації.

Метрологічні характеристики – характеристики засобів вимірювань, що нормуються для визначення результату вимірювання та його похибок.

Клас точності засобу вимірювань – узагальнена характеристика засобу вимірювань, що визначається межами його допустимих основної та додаткових похибок, а також іншими характеристиками, які впливають на його точність.

Метрологічна служба – мережа організацій, окрема організація або окремий підрозділ, на які покладено відповідальність за забезпечення єдності вимірювань у закріпленій за ними сфері діяльності.

1.2 Поняття вимірювання

Поняття вимірювання можна визначити як пізнавальний процес, що полягає в порівнянні шляхом фізичного експерименту даної фізичної величини із певним її значенням, яке взято за одиницю порівняння.

Вимірювання згідно з ДСТУ 2681-94 «Метрологія. Терміни та визначення» – відображення вимірюваних величин їх значеннями шляхом експерименту й обчислень за допомогою спеціальних технічних засобів.

Специфіка поняття вимірювання виявляється в трьох його ознаках, поєднанням яких воно відрізняється від суміжних понять.

Перша ознака характеризує безпосередню мету вимірювань – знайти значення даної конкретної величини. У згаданих визначеннях ця ознака відображається висловами «пізнавальний процес», «одержання інформації», «знаходження значень величин».

Друга ознака – шлях, яким знаходять значення вимірюваної величини. Це – фізичний експеримент (дослід), який здійснюється за допомогою спеціальних технічних засобів.

Третя ознака – сутність знаходження значення вимірюваної величини, якою є порівняння інформації про даний розмір величини з інформацією про розмір її одиниці або про певний інший її розмір (відносні вимірювання).

Множина істинних значень вимірюваної величини та множина її істинних числових значень є імовірнісними множинами, що пов'язані між собою через вибрану одиницю, яка відіграє роль коду. Отже, множина істинних числових значень вимірюваної величини становить вимірювальну інформацію про розмір фізичної величини.

1.2.1 Поняття результату й похибки вимірювання

Експериментатор, виконуючи операції процесу вимірювань, одержує результати спостережень про значення вимірюваної величини, які називають результатами спостережень при вимірюваннях. Вони можуть бути однократними (одноразовими) або багатократними (багаторазовими).

Результат вимірювання як значення величини, що знайдено шляхом її вимірювання, одержують після відповідного оброблення результатів спостережень, на основі яких визначають кількісні показники точності й вибирають форму подання результату вимірювання згідно з відповідними державними стандартами.

У випадку однократного спостереження результат вимірювання знаходять, оцінюючи за відомими метрологічними характеристиками засобів вимірювань межі, в яких за даних умов із заданою ймовірністю може бути значення похибки вимірювання, і подають результат у належній стандартній формі.

Отже, результат вимірювання – це знайдене значення вимірюваної величини із стандартною оцінкою його точності, яка визначається характеристиками похибки вимірювань. Звідси виходить, що необхідно вміти коректно оцінювати значення похибок результатів вимірювань.

Абсолютна похибка є різницею наближеного x і взятого (прийнятого) за точне X значень певної величини: $D = x - X$. Абсолютна похибка не дає повного уявлення про точність вимірювання.

Тому користуються поняттям *відносної похибки*: $d = D / X$.

Подані вирази – це спрощені моделі похибок. Практично значення похибок залежать від значень вимірюваних чи перетворюваних величин та інших аргументів, що враховуються далі відповідним ускладненням їх моделей.

1.2.2 Поняття, що пов'язані з вимірюванням

Принципом вимірювань називають сукупність явищ, на яких базується вимірювання. *Метод вимірювань* – спосіб використання принципів і засобів вимірювань, його основна ознака – це спосіб виконання операції порівняння.

Режим вимірювань (статичний або динамічний) – режим, який визначається характеристиками засобів вимірювань, вхідних сигналів і тривалістю їх перетворення. Статичний режим буває тоді, коли вхідний сигнал є сталою величиною або стаціонарним процесом, пов'язана з ним вимірювана величина не залежить від часу. Динамічний режим є при вимірюванні миттєвих значень змінних величин, а також значень сталих величин чи інтегральних значень стаціонарних процесів, якщо тривалість перетворення є не достатньою для усталення вихідного сигналу.

Алгоритм вимірювань – детермінований (регулярний) або стохастичний (нерегулярний) – це сукупність правил підготовки й виконання операцій процесу вимірювань.

Процес вимірювань як сукупність операцій перетворення вимірювальної інформації за певним алгоритмом, який визначає послідовність їх виконання в часі залежно від ступеня необхідної участі в ньому експериментатора, може бути неавтоматизованим, автоматизованим і автоматичним.

Поєднання методу й алгоритму вимірювань становить методику вимірювань. Методика вимірювань, в якій вимоги до виконання вимірювань регламентовані відповідним нормативно-технічним документом (НТД), називається *методикою виконання вимірювань* (МВВ).

Вимірювання за атестованими МВВ можуть виконуватися й засобами вимірювань, метрологічні характеристики яких визначені конкретно під час їх метрологічній атестації.

У них мають бути вказані:

- призначення МВВ;
- норми похибок вимірювань, встановлені початковими вимогами, або значення характеристик похибок, що гарантуються при застосуванні МВВ;
- вимоги до засобів вимірювань і допоміжних пристроїв, що необхідні для виконання вимірювань;
- метод (алгоритм) вимірювань;
- вимоги безпеки;
- вимоги до кваліфікації операторів;
- умови вимірювань;
- інформація щодо підготовки до виконання вимірювань
- інформація щодо виконання вимірювань;
- способи оброблення результатів спостережень при вимірюваннях;
- правила оформлення результатів вимірювань;
- інформація щодо контролю похибки МВВ з указанням методу й періодичності.

1.3 Геометричні параметри деталей

Точність геометричних параметрів деталей характеризується не тільки точністю розмірів її елементів, але й точністю форми та взаємного розташування поверхонь.

При аналізі точності геометричних параметрів деталей оперують такими поняттями:

Номінальна поверхня, розміри та форма якої відповідають заданим номінальним розмірам і номінальній формі.

Реальна поверхня, яка обмежує деталь і відокремлює її від довкілля.

Профіль – лінія перетинання поверхні з площиною або із заданою поверхнею (існують поняття реального та номінального профілів, аналогічні поняттям номінальної та реальної поверхонь).

Прилегла поверхня, яка має форму номінальної поверхні, що дотична до реальної поверхні та розташована поза матеріалом деталі так, щоб

відхилення від неї найбільш віддаленої точки реальної поверхні в межах нормованої ділянки мало мінімальне значення. Прилеглу поверхню застосовують як базову при визначенні відхилень форми та розташування.

База – елемент деталі або поєднання елементів, відносно яких задають допуск розташування елемента, що розглядається, а також визначають відповідні відхилення.

1.3.1 Відхилення й допуски форми

Відхиленням форми EF називається відхилення форми реального елемента від номінальної форми, що оцінюється найбільшою відстанню від точок реального елемента по нормалі до прилеглого елемента. Нерівності, що відносяться до шорсткості поверхні, у відхилення форми не входять. Допуском форми TF називається найбільш допустиме значення відхилення форми.

Види допусків форми, їх позначення та зображення на кресленнях наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Допуски форми

№ п/п	Вид допуску та його позначення	Зображення на кресленні
1	Допуск циліндричності TFZ	
2	Допуск круглості TFK	
3	Допуск профілю поздовжнього перетину циліндричної поверхні TFP	
4	Допуск площинності TFE	
5	Допуск лінійності TFL	

Вибір допусків залежить від конструктивних і технологічних вимог і, крім того, пов'язаний з допуском розміру. Жодне з відхилень форми не може перевищувати допуску розміру.

1.3.2 Відхилення й допуски розташування поверхонь

Відхиленням розташування EP називається відхилення реального розташування даного елемента від його номінального розташування. Під номінальним розуміють розташування, яке визначається номінальними лінійними й кутовими розмірами на кресленні виробу.

Допуском розташування TP називається межа, що обмежує допустиме значення відхилення розташування поверхонь.

Види допусків розташування, їх позначення й зображення на кресленнях наведені в таблиці 1.2.

Сумарним відхиленням форми й розташування поверхонь ЕС називається відхилення, що є результатом спільного виявлення відхилення форми та відхилення розташування розглянутої поверхні або розглянутого профілю щодо баз.

Таблиця 1.2 – Допуски розташування

	Площина		Циліндр	
	Вид допусків розташування	Зображення	Вид допусків розташування	Зображення
Площина	Паралельності TPA	//		
	Перпендикулярності TPR			
	Нахилу TPN			
	Симетричності TPS			
Циліндр	Паралельності TPA	//	Паралельності осей TPA	//
	Перпендикулярності TPR		Перекосу осей TPAy	//
	Нахилу TPN		Перпендикулярності TPR	
	Симетричності TPS		Нахилу TPN	
	Позиційний TPP		Співвісності TPC	

Види сумарних допусків форми й розташування, їх позначення та зображення на кресленнях наведені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Сумарні допуски форми та розташування

№ п/п	Вид допуску та його позначення	Зображення на кресленні
1	Допуск торцевого биття TCA	
2	Допуск повного торцевого биття TCTA	
3	Допуск радіального биття TCR	
4	Допуск повного радіального биття TCTR	
5	Допуск биття в заданому напрямку TCD	
6	Допуск форми заданого профілю TCL	
7	Допуск форми заданої поверхні TCE	

Поле сумарного допуску форми та розташування ТС – це область у просторі або на заданій поверхні, всередині якої мають знаходитися всі точки реальної поверхні або реального профілю в межах нормованої ділянки. Це поле має задане номінальне положення щодо баз.

Контрольні запитання

1. Охарактеризуйте галузь метрології та надайте основні поняття, на яких вона базується.
2. Назвіть терміни, якими оперує метрологія.
3. На яких трьох ознаках базується поняття «вимірювання»?
4. Що враховують при визначенні результатів вимірювань та що впливає на результат вимірювань?

2 КООРДИНАТНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ МАШИНИ

2.1 Координатне вимірювання заготовок і деталей

Координатне вимірювання – це процедура, яка визначає координати окремих точок поверхонь об'єкта геометричного контролю в прийнятій системі координат з наступним математичним обробленням для визначення лінійних і кутових розмірів, відхилень форми та розташування.

Основною процедурою при всіх вимірюваннях, що здійснюються за допомогою координатно-вимірювальних машин (КВМ), є вимірювання точки шляхом торкання наконечника вимірювальної головки (ВГ) поверхні деталі, що вимірюється.

2.1.1 Основні терміни в галузі координатних вимірювань

Геометрія деталі – сукупність поверхонь (геометричних елементів), що обмежують деталь і характеризуються розмірами, формою та розташуванням.

Замінююча геометрія деталі – геометрія, утворена замінюючими поверхнями (геометричними елементами).

Замінюючий елемент – поверхня або лінія номінальної форми, що апроксимує реальну поверхню або лінію та розрахована за координатами точок вимірювання відповідно до прийнятої умови апроксимації.

Математичне базування – процедура, яка полягає в розрахунку розташування системи координат деталі (СКД) за виміряними в системі координат машини (СКМ) точками базових елементів деталі до подальшої трансформації координат точок інших елементів деталі з СКМ у СКД.

Номінальна геометрія деталі – геометрія, задана кресленням або іншими технічними документами, тобто утворена поверхнями (геометричними елементами), що мають номінальні розміри, форму та розташування.

Реальна геометрія деталі – геометрія, утворена реальними поверхнями (геометричними елементами).

СКД – система координат, утворена базами деталі. У тих випадках, коли розміри та розташування окремих елементів деталей задані щодо різних баз, для однієї деталі може бути кілька систем координат деталі.

СКМ – система координат, утворена напрямними координатних переміщень і вимірювальними системами КВМ.

Стратегія вимірювання – кількість, розташування та послідовність обходу точок вимірювання під час координатних вимірювань деталі.

Сканування – це переміщення вимірювального щупа над поверхнею об'єкта контролю в режимі стеження за заданим законом.

2.1.2 Координатне вимірювання на верстатах із ЧПК

Використання ВГ на обробних верстатах із ЧПК дає можливість визначати розміри без знімання деталі з верстата, тобто максимально зближувати операції контролю й оброблення (рисунок 2.1).

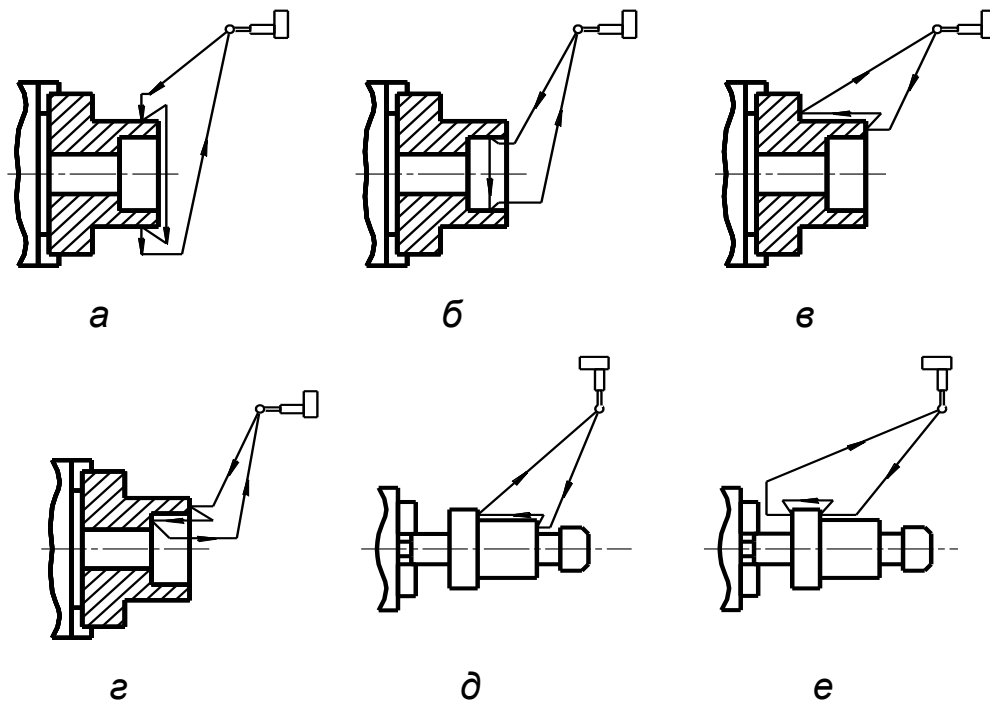
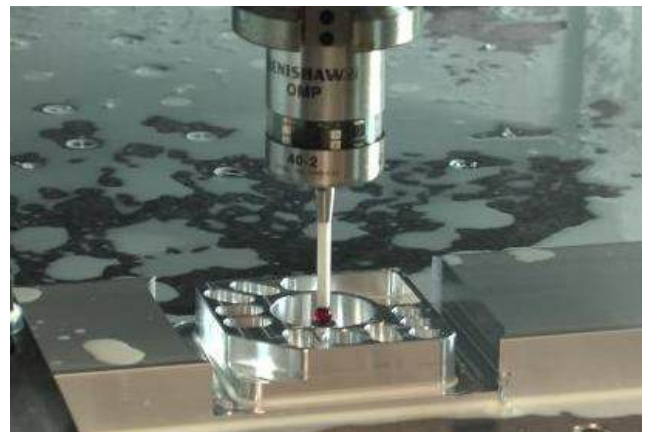


Рисунок 2.1 – Типові схеми застосування ВГ для вимірювання:
 а, б – відповідно зовнішньому й внутрішньому діаметрам;
 в, г, д – довжини обробленої поверхні; е – товщини фланця

Поштовхом до промислового освоєння координатного вимірювання безпосередньо на верстаті із ЧПК стало створення ВГ, що передають сигнали вимірів безконтактним шляхом за допомогою інфрачервоного випромінювання (рисунок 2.2).



а



б

Рисунок 2.2 – Застосування ВГ із контактними щупами:
 а – щуп в інструментальній оправці; б – контроль деталі на верстаті із ЧПК

Схеми використання ВГ із застосуванням щупа на багатоопераційному верстаті із ЧПК зображено на рисунку 2.3.

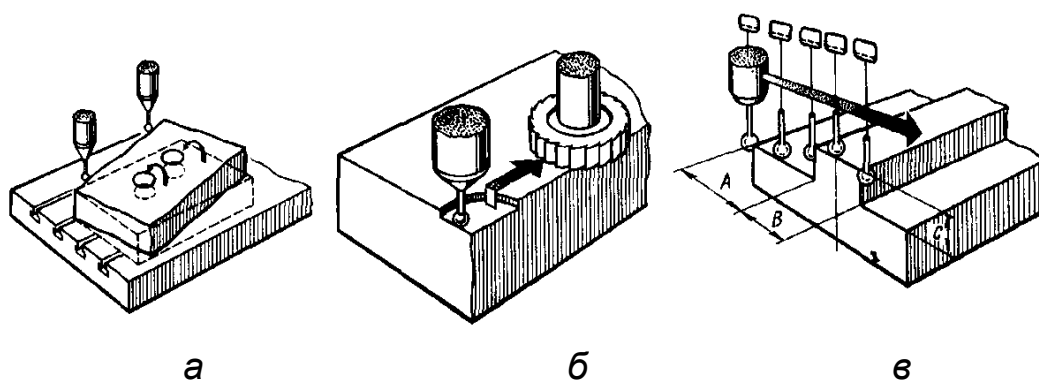


Рисунок 2.3 – Схеми застосування ВГ для вимірювання: а – похибки установлення заготовки панелі; б – величини припуску; в – розмірів деталі

Координатне вимірювання, яке здійснюється безпосередньо на верстаті, забезпечує високу оперативність під час контролю геометричних параметрів деталей, що виготовляються, і реалізації адаптивного керування точністю оброблення.

Результати вимірювань статистично обробляють, щоб визначити тенденцію зміни величини систематичної складової похибки, а також виключити вплив випадкових відхилень. Результати вимірювань використовують також для того, щоб коригувати керуючі або вимірювальні програми.

2.1.3 Контроль траєкторії руху інструмента

Керуюча програма (КП) оброблення як сукупність команд мовою програмування, з точки зору технолога, є описом операційного технологічного процесу (ТП) мовою пристрою верстата із ЧПК.

Підсистема ЧПК, будучи одним із компонентів комп'ютерної системи, використовує необхідну інформацію з єдиної бази даних системи. Зовнішньою початковою інформацією для підсистеми ЧПК є геометрична модель деталі, що обробляється, каркасного (рисунок 2.4, а) або поверхневого (рисунок 2.4, б) зображення.

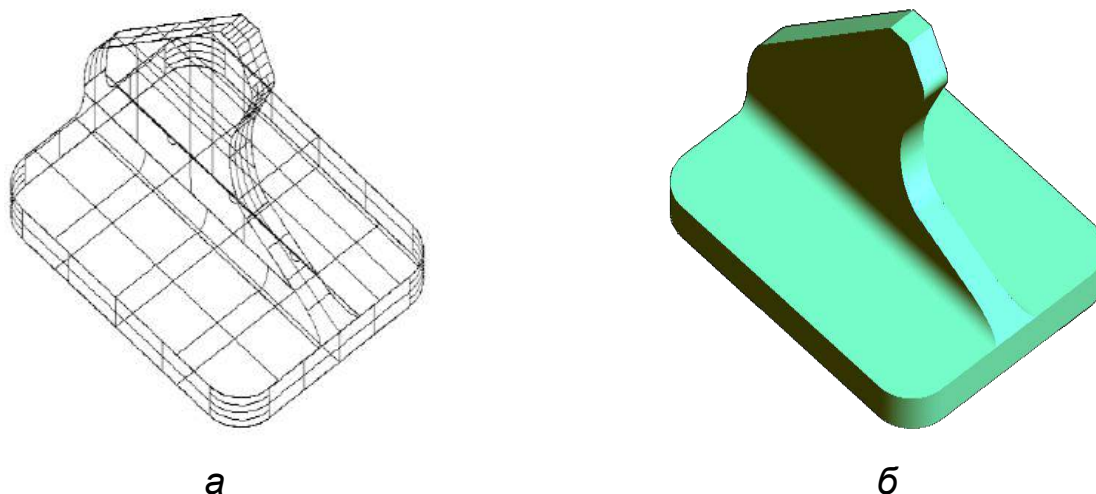


Рисунок 2.4 – Комп'ютерна геометрична модель деталі: а – каркасна; б – поверхнева

З досвіду впровадження комп'ютерних інтегрованих систем в авіабудуванні відомо, що близько 80 % завдань з формування КП не потребує використання твердотільних моделей.

Практично всі завдання площинного контурного фрезерування, свердлування й токарного оброблення можна вирішити на рівні каркасних і поверхневих моделей. При цьому обсяг інформації, необхідної для вирішення цих завдань, значно менший, ніж у разі твердотільного параметричного моделювання.

Етапи створення КП оброблення на базі комп'ютерних інтегрованих систем зображено на рисунку 2.5.

Маршрутний ТП містить послідовність технологічних операцій, що забезпечують необхідне оброблення деталі.

Залежно від того, яким устаткуванням здійснюється програмне оброблення, технологічна операція може бути токарною, фрезерною, зварювальною, контрольною тощо. Операція складається з послідовності технологічних переходів.

Перехід – це параметризований опис траєкторії руху інструмента, технологічних режимів оброблення (подачі, частоти обертання шпинделя) й геометрії інструмента.

Поняття технологічного переходу можна узагальнити, якщо під обробленням розуміти виконання необхідних рухів незалежно від виду процесу. Тоді, наприклад, процес автоматичного вимірювання деталі вимірювальними головками також можна класифікувати як технологічний перехід.

Формування власне КП здійснюється у два етапи (рисунок 2.5). На першому етапі оброблення початкової інформації реалізується процесором.

Процесор – програма первинного перероблення інформації, яка формує дані щодо оброблення незалежно від типу верстата.

Процесор виконує такий комплекс завдань із розрахунку траєкторії руху інструмента:

- зведення опису всіх заданих геометричних об'єктів до канонічної форми;
- знаходження точок і ліній перетину різних геометричних елементів;
- апроксимація різних кривих і поверхонь із заданим допуском; апроксимація або інтерполяція таблично заданих функцій;
- урахування геометричних параметрів інструмента під час побудови траєкторії руху.

На другому етапі формування КП перероблення інформації реалізується постпроцесором, який орієнтований на відміну від процесора на конкретну модель технологічного устаткування із ЧПК.

Постпроцесор – узгоджувальна програма, яка враховує особливості системи ЧПК конкретного верстата й формує кадри КП мовою програмування в кодах ISO.

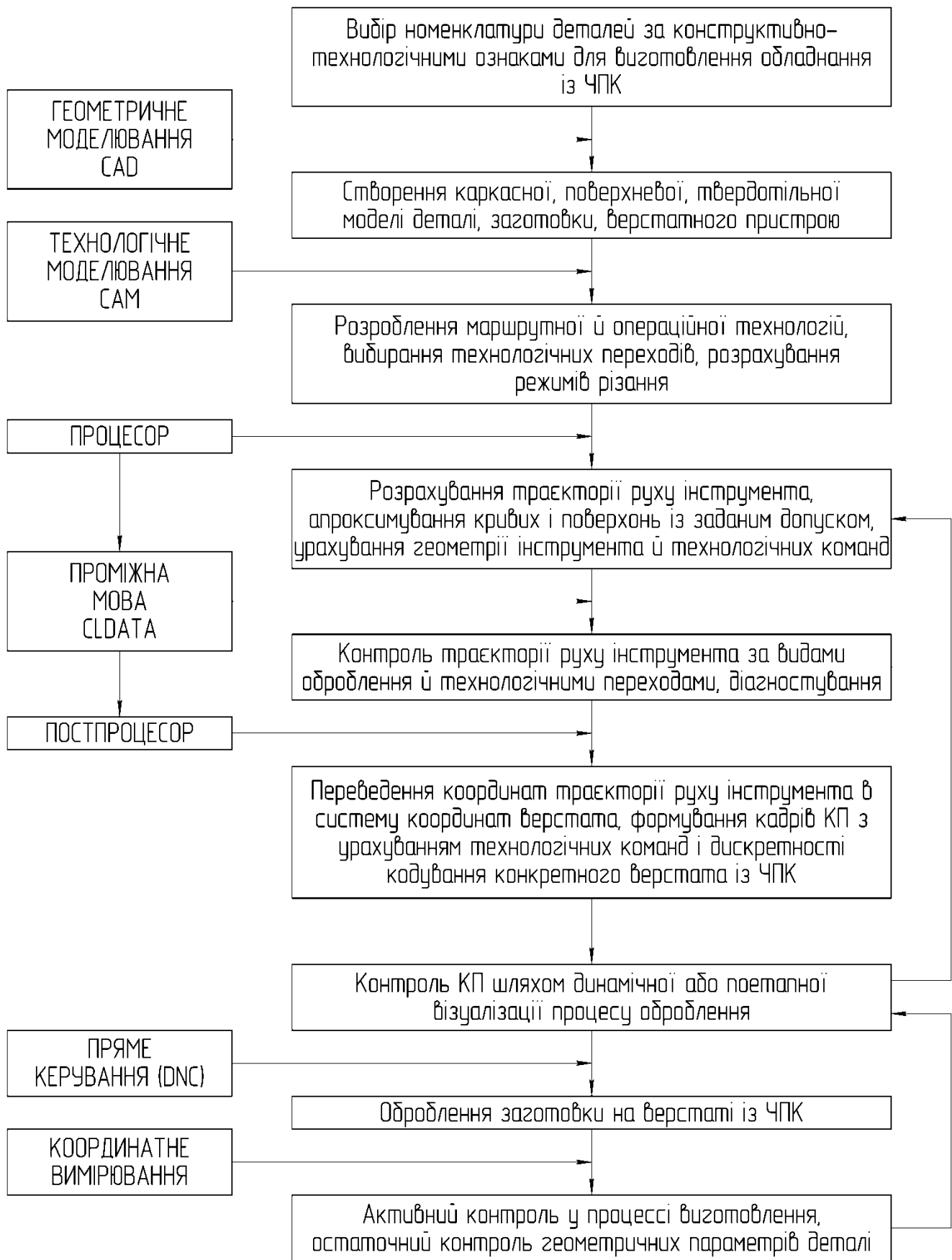


Рисунок 2.5 – Етапи створення КП оброблення на базі комп'ютерних інтегрованих систем

Результатом роботи процесора є повністю розрахована траєкторія руху інструмента (рисунок 2.6).

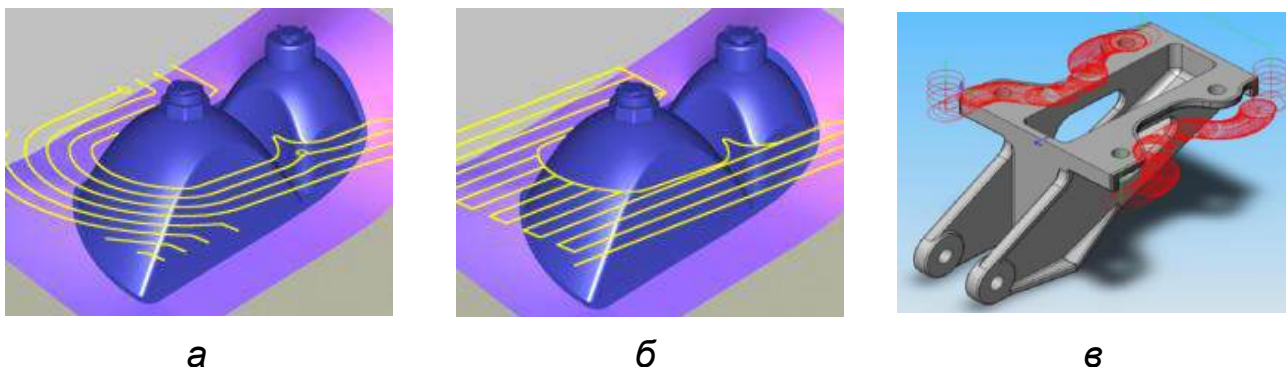


Рисунок 2.6 – Вибір типу та контроль траєкторії руху інструмента на етапі процесування: а – «спіраль»; б – «зигзаг»; в – чистове фрезерування

Постпроцесор виконує такі типові функції:

- переведення координат траєкторії руху інструмента в систему координат технологічного устаткування;
- визначення величин подачі робочих і допоміжних переміщень за паспортними характеристиками подач конкретного верстата;
- формування й кодування підготовчих і допоміжних функцій, команд на координатні переміщення з урахуванням значення одиниці дискретності (ціни імпульсу) пристрою із ЧПК;
- кодування значень подач і частоти обертання шпинделя;
- формування команд заміни інструмента, а також коригування його довжини й радіуса, вмикання та вимикання подачі змащувально-охолоджувальної рідини (ЗОР);
- виконання низки сервісних функцій (підрахування обсягу КП, часу оброблення деталі на верстаті й ін.).

Формуючи команди на переміщення, постпроцесор ураховує вид інтерполяції (лінійна, колова), спосіб задавання переміщення (в абсолютній системі, у приростах).

Найважливіша функція постпроцесора – урахування обмежень технологічного устаткування із ЧПК: межі переміщення виконавчих органів й змінення швидкостей подачі й частоти обертання шпинделя, максимально допустимі швидкості й перепади швидкостей виконавчих органів устаткування, межі змінення радіуса дуги кола під час колової інтерполяції тощо.

Результатом урахування обмежень можуть бути автоматичне коригування постпроцесором величин і режимів подачі, змінення швидкості шпинделя й траєкторії руху інструмента, видача діагностичного повідомлення.

Траєкторія руху інструмента може бути змінена, наприклад, під час задавання переміщення на прискореній подачі більше ніж за однією координатою одночасно, що є недопустимим для більшості верстатів. У такій ситуації постпроцесор може організувати покоординатний рух у задану точку, зберігаючи незмінним значення прискореної подачі.

Розширення можливостей технологічного устаткування із ЧПК, а також потреба в уніфікації структури даних зумовили створення за рекомендаціями ISO стандартної проміжної мови «процесор – постпроцесор». Цю форму зображення проміжних даних називають CLDATA (скорочення від Cutter Location Data – дані про положення інструмента).

2.1.4 Візуалізація послідовності процесу оброблення

Візуалізація послідовності процесу оброблення дає можливість виявити помилки, які можуть виникнути, зокрема, з вини постпроцесора CAD/CAM-системи.

Контроль КП здійснюють візуально на екрані комп'ютера шляхом динамічної або поетапної візуалізації послідовності процесу оброблення заготовки (рисунок 2.7).

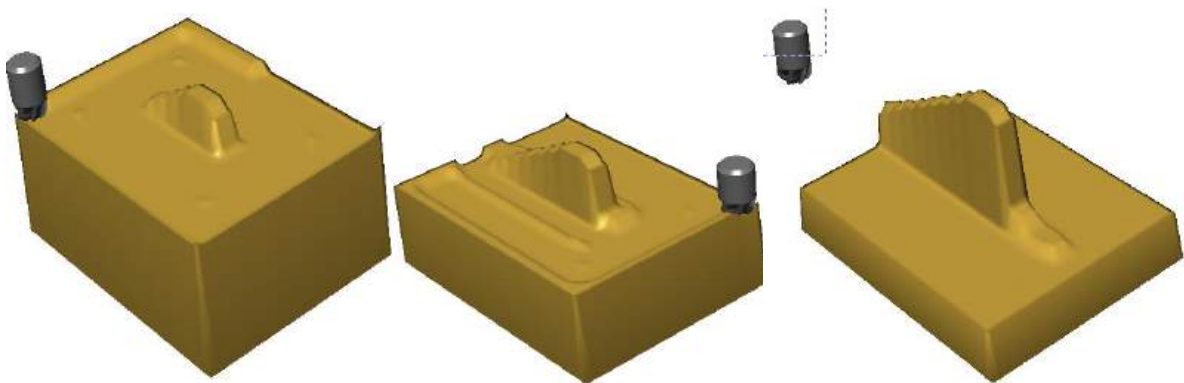


Рисунок 2.7 – Поетапна візуалізація процесу оброблення

Програма візуалізації процесу оброблення дає можливість:

- контролювати КП безперервно або по окремих кадрах із відображенням у разі потреби траєкторії інструмента й виділенням різними кольорами зон оброблення;
- розраховувати розміри заготовки й час оброблення;
- змінювати ракурс і масштаб зображення, відображати поверхні, що оброблюються.

Візуалізація процесу оброблення значно скорочує час для перевірки КП і підвищує її вірогідність.

Для остаточного контролю геометричних параметрів великогабаритних деталей та оснастки на підприємствах аерокосмічної галузі застосовують KBM, укомплектовані персональними комп'ютерами для керування процесом контролю й оброблення результатів вимірювань.

2.2 Компонування стаціонарних KBM

Ефективність застосування KBM залежить не тільки від її функціональних можливостей, але і від правильності вибору комплектування і моделі KBM для конкретного виробництва.

Для нормальної експлуатації прецизійних KBM необхідно мати лабораторні термостатичні та знепилені приміщення.

При виборі КВМ необхідно вивчити креслення намічених до контролю деталей. Аналізують найбільші розміри, конфігурацію поверхонь, найбільш складні метрологічні задачі, визначають тип виробництва. Критерії вибору моделі КВМ наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Критерії вибору моделі КВМ

Параметри, що контролюються	Характеристика КВМ
Максимальні розміри	Граничні значення координатних переміщень
Конфігурація	Компонування КВМ, необхідність наявності поворотного столу
Метрологічні задачі	Тип ВГ; число, розміри та форма вимірювальних наконечників і склад програмно-математичного забезпечення
Геометрична точність	Допустимі похибки КВМ та умови її експлуатації
Тип виробництва	Рівень автоматизації КВМ і склад периферійного обладнання

За конфігурацією деталей вибирають найбільш відповідне компонування КВМ. Компонування значною мірою визначає характеристики КВМ і вимоги до конструкції та параметрів основних вузлів.

У свою чергу компонування залежить від габаритних розмірів і маси вимірюваних деталей; розташування вимірюваних поверхонь; необхідного числа координатних переміщень для реалізації оптимального співвідношення точності та продуктивності процесу вимірювання.

Важливим показником компонування КВМ є напрям переміщення вузла, що несе ВГ. За цією ознакою компонування поділяють на вертикальне й горизонтальне.

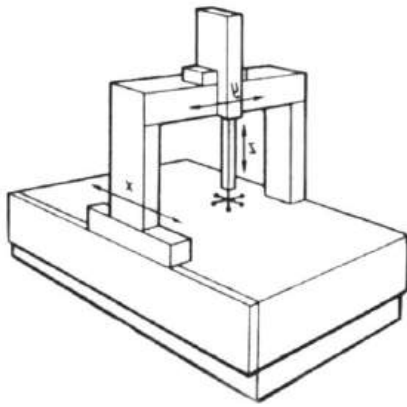
КВМ вертикального компонування має велику жорсткість, більш високу точність, менш чутливі до зміни маси ВГ. Вони забезпечують досить хороший доступ до вимірюваних елементів, розташованих по всій поверхні деталі. Вимірювальний простір КВМ вертикального компонування обмежується стояками й рухливими вузлами з однієї, двох або трьох сторін.

Вертикальне компонування КВМ щодо обладнання базових вузлів поділяють на порталне й мостове.

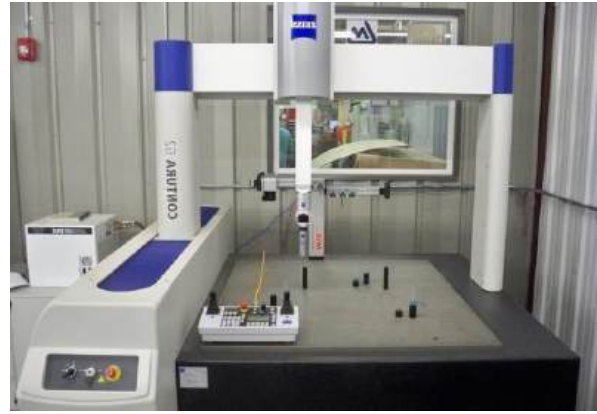
2.2.1 Портальне компонування КВМ

Портальні компонування найбільш поширені і подані рядом різних варіантів. Характерною особливістю цих компонувань є П-подібний портал. За горизонтальною віссю порталу переміщується каретка, яка несе пересувний уздовж вертикальної осі піноль з ВГ (рисунок 2.8, а).

Портальні компонування мають високу жорсткість основних вузлів, точність, хороші динамічні властивості, досить відкритий простір для встановлення деталі та її оглядовістю в процесі вимірювання. Для КВМ порталного компонування з рухомим порталом складно збільшити діапазон переміщення по вертикальній осі. На рисунку 2.8, б показано КВМ порталного компонування моделі Contura G2 компанії ZEISS (Німеччина).



а



б

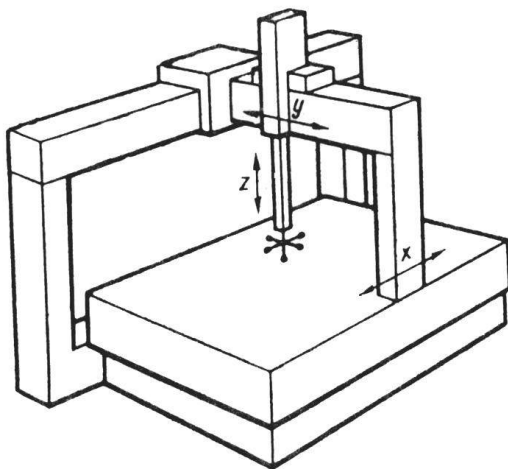
Рисунок 2.8 – Портальне компонування КВМ

При збільшенні висоти стояків порталу зменшується його жорсткість і збільшується амплітуда кутових коливань під дією сил інерції через деформації самого порталу, стояків, підшипників його переміщення й вузлів їх установки.

Підвищення жорсткості шляхом збільшення розмірів згаданих елементів призводить до підвищення маси та зниження швидкодії машини.

Підвищену жорсткість і стабільність несучої рухомої ланки при порівняно невеликій її масі мають КВМ із рухомим Г-подібним напівпорталом, утвореним із жорсткою горизонтальною поперечкою та легкою опорою (рисунки 2.9, а). Напівпортал одним кінцем поперечки базується на піднятій і жорстко прикріпленій відносно основи балці з напрямними, а вільним кінцем за допомогою опори на повітряній подушці спирається на базову плиту КВМ. Таке компонування рекомендують для прецизійних КВМ середніх габаритних розмірів зі збільшеним переміщенням по вертикальній осі, для яких вимірювальний простір близький до куба.

На рисунку 2.9, б показано високоточну КВМ із напівпорталом і гранітною базовою плитою моделі LH 1515 компанії WENZEL (Німеччина).



а



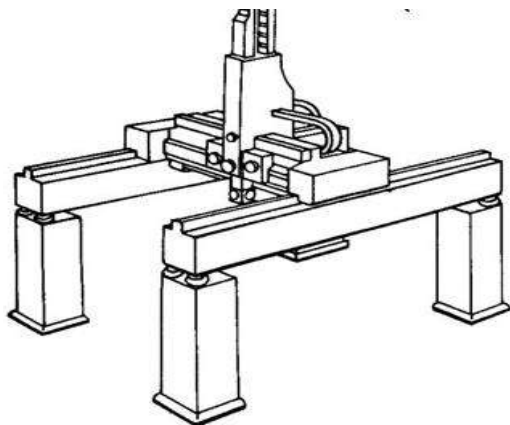
б

Рисунок 2.9 – Компонування КВМ із напівпорталом

2.2.2 Мостове компонування КВМ

Мостове компонування дозволяє отримати меншу порівняно з іншими компонуваннями масу рухомих вузлів при високих його жорсткості та стійкості. Його використовують для великогабаритних КВМ різних класів точності (рисунок 2.10, а).

На рисунку 2.10, б показано КВМ моделі ALPHA GG фірми DEA (Італія) мостового компонування, яка знаходиться на ДП «АНТОНОВ».



а



б

Рисунок 2.10 – Мостове компонування КВМ

Застосування модульного принципу дозволяє збільшити розміри вимірювального простору (рисунок 2.11, а) та створити спеціалізовані КВМ мостового компонування (рисунок 2.11, б).



а



б

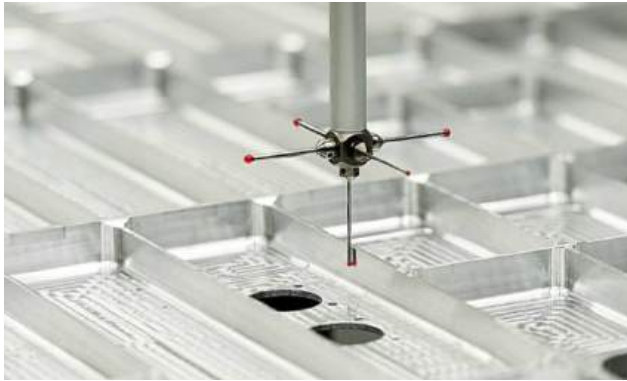
Рисунок 2.11 – Мостове компонування КВМ: а – з двома порталами;
б – спеціалізоване для контролю монолітних панелей

Розміри вимірювального простору КВМ мостового компонування фірми DEA (Італія) по осях лінійних переміщень можуть варіюватися в діапазонах: X – від 2 500 до 6 000 мм; Y – від 4 000 до 20 000 мм; Z – від 2 000 до 4 000 мм.

Спеціалізована КВМ моделі DELTA AB тієї ж фірми призначена для контролю довгомірних монолітних панелей і має такий вимірювальний простір: X – 3 000 мм; Y – 20 000 мм; Z – 500 мм.

В абсолютній похибці вимірювань стаціонарних КВМ враховано довжину переміщення вимірювального щупа: $E = \pm 5,5 + 6L / 10000$, мкм.

Стаціонарні КВМ забезпечують високоточний контроль лінійних і кутових розмірів, параметрів форми та взаємного розташування великогабаритних поверхонь, у тому числі й отворів (рисунк 2.12).



а



б



в



г

Рисунок 2.12 – Приклади геометричного контролю за допомогою КВМ:

а – монолітної панелі; б – отворів; в – лопаті вертольота (Mi-28);

г – форми для виклеювання (ХДАВП)

Основною процедурою при всіх вимірюваннях, що здійснюються за допомогою КВМ, є вимірювання точки шляхом торкання наконечника ВГ поверхні деталі.

При виборі КВМ необхідно поряд із типом ВГ визначити й потрібний комплект вимірювальних наконечників. Для вимірювання простих геометричних елементів деталей та їх взаємного розташування можна обмежитися голівкою торкання. Для вимірювання складних плоских і просторових поверхонь методом безперервного спостереження КВМ необхідно комплектувати *голівкою відхилення*.

Такі метрологічні завдання, як вибір мінімальної та максимальної до-

вжини вимірювальних наконечників, мінімального діаметра контакту кульки, максимальної кількості вимірювальних наконечників, що використовують одночасно, вирішують шляхом докладного аналізу креслення деталі.

За допуском на номінальні розміри деталей визначають гранично допустиму похибку KBM. Похибка KBM орієнтовно має скласти не більше 30% від допусків на розміри деталей.

Технологія п'ятикоординатного переміщення ВГ для автоматичного контролю великої кількості поверхонь здійснюється шляхом використання поворотно-обертальної головки моделі PH10M англійської фірми Renishaw. Механізована головка може повертатися навколо двох осей з кроком $7,5^\circ$ у діапазоні $\pm 60^\circ$ по кожній осі, що дозволяє оперативно відслідковувати зміни форми виробу, що контролюється (рисунок 2.13, а). На рисунку 2.13, б показано зони підходу щупа на механізованій ВГ моделі PH10M при різному розташуванні поверхонь, що контролюються.

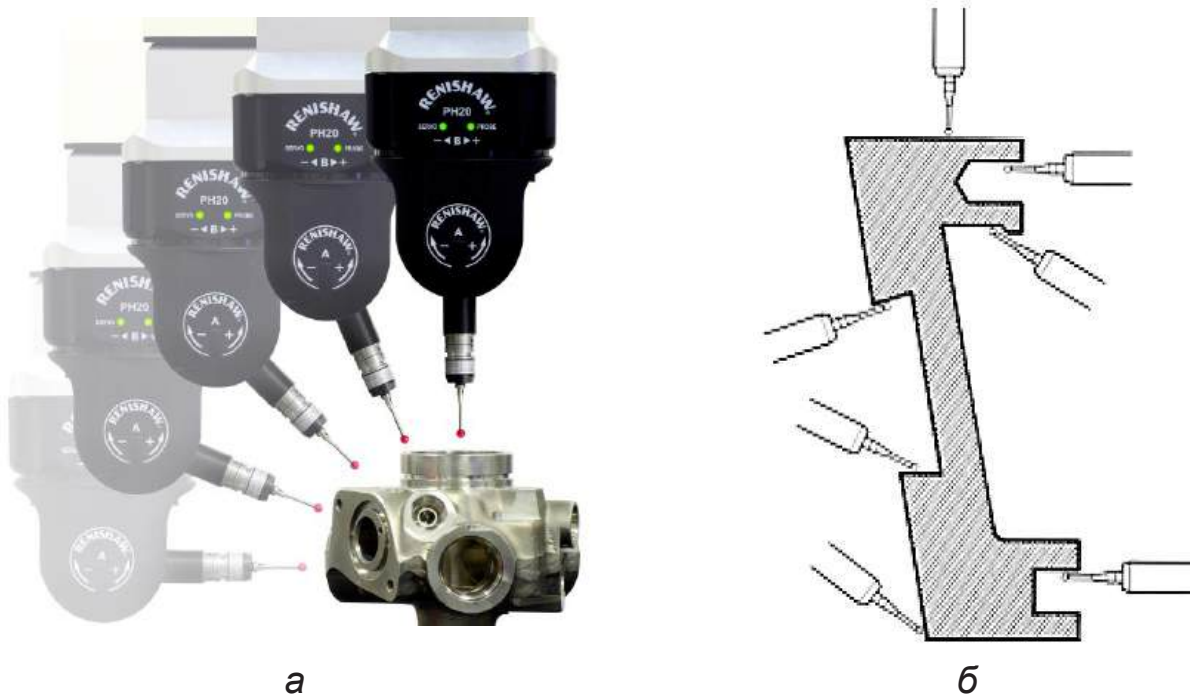


Рисунок 2.13 – Механізована вимірювальна головка моделі PH10M

Незалежно від компонування метрологічну атестацію стаціонарних KBM проводять за міжнародними нормами «DKD-R-43 Calibration of measurement equipment for geometric measurements» відповідно до стандартів DIN EN ISO 10360 та VDI / VDE 2617.

В Україні дійсний аналогічний ДСТУ 10360-2:2006 «Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Приймальні та контрольні випробування координатно-вимірювальних машин». Цей стандарт установлює порядок проведення приймальних випробувань щодо перевірки заявленої виробником точності KBM для вимірювання розмірів. Він також установлює порядок контрольних випробувань, які періодично проводить користувач, щоб підтвердити точність KBM для вимірювання розмірів.

2.3 Компонування мобільних КВМ

Мобільна КВМ має шарнірно-важільне компонування і являє собою вимірювальну систему зі сферичним робочим простором. У кожному шарнірі є датчик контролю кутових переміщень, який в режимі реального часу стежить за кутом повороту важеля. Комп'ютер, знаючи інформацію про довжину кожного важеля та кута його повороту, прораховує координати X, Y, Z відкаліброваного контактного щупа в будь-якій точці простору (рисунок 2.14, а). Мобільні КВМ американських компаній FARO Technologies Inc. (рисунок 2.14, б) і ROMER добре зарекомендували себе в різних галузях промисловості, в тому числі й авіабудуванні.

На рисунку 2.14, в показано етап вимірювання фрагмента аеродинамічної продувної моделі крила на ДП «АНТОНОВ» за допомогою мобільної КВМ моделі Arm Sigma 2030 компанії ROMER.

Робочими зонами уніфікованої серії КВМ компанії FARO Technologies є сфери з радіусами 0,6; 0,9; 1,2; 1,5; 1,7 м. Для мобільної КВМ моделі Arm Sigma 2030 компанії ROMER радіус вимірювань зі стаціонарної позиції становить 2 м.

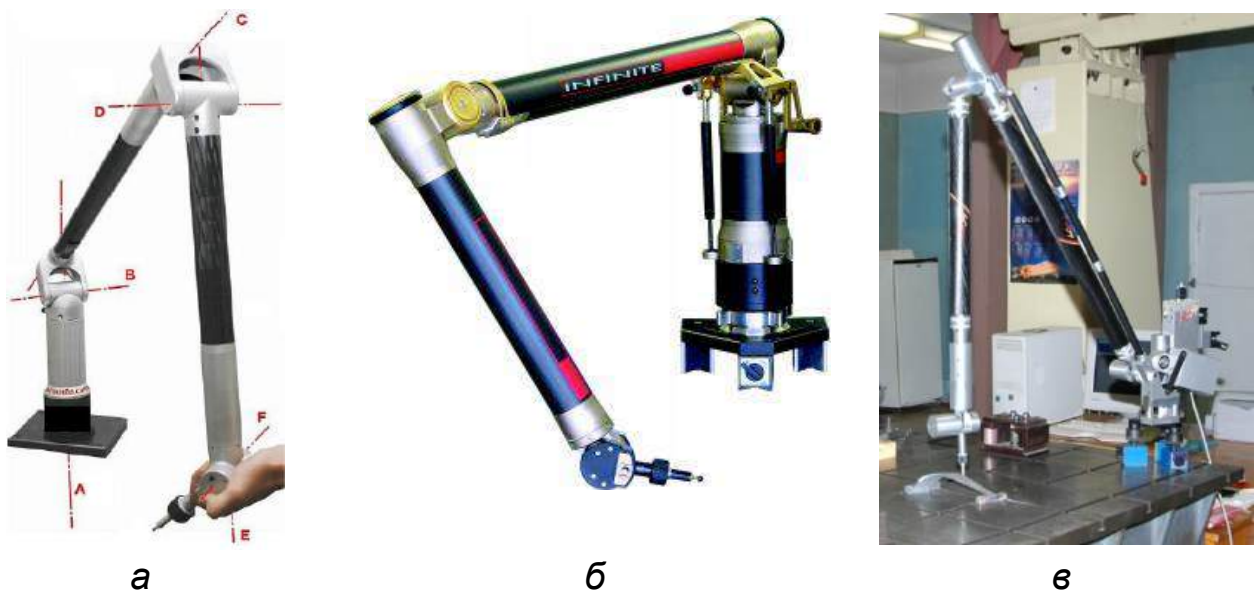


Рисунок 2.14 – Найменування осей та компонування мобільної КВМ

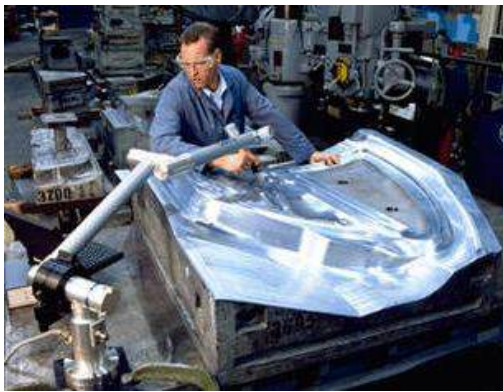
КВМ працюють за методом обшупування виробів контактним датчиком і зняття відповідних координат точок. За координатами даних точок комп'ютер здатний побудувати будь-які геометричні примітиви з їх реальними розмірами, положенням щодо базових поверхонь виробу та взаємним розташуванням елементів відносно один одного. Таким чином, можна проконтролювати будь-який лінійний або кутовий розмір, заданий конструктором у кресленні, а також відхилення від площинності, паралельності, співвісності, биття поверхонь. Паспортними характеристиками будь-якої мобільної КВМ є повторюваність вимірювань і похибка лінійних вимірювань.

Повторюваність вимірювань – максимальне абсолютне відхилення виміряної точки від середнього значення в спеціальному тесті. Щуп зі сферичним наконечником поміщують у конічний отвір калібрувального пристосування, потім проводять вимірювання координат центру щупа при різних положеннях важеля з ВГ.

Похибку лінійних вимірів визначають із використанням сертифікованих еталонів довжини, які вимірюють у різних положеннях і орієнтаціях у межах робочого вимірювального простору мобільної КВМ.

Найточніша КВМ FARO Platinum 4 має повторюваність $\pm 0,006$ мм, точність $\pm 0,018$ мм на радіусі робочої зони 1,2 м.

Мобільну КВМ установлюють у безпосередній близькості до об'єкта геометричного контролю (рисунок 2.15).



а



б



в



г

Рисунок 2.15 – Приклади контролю за допомогою мобільних КВМ:
а – технологічної оснастки; б – зварного вузла;
в – стапеля крила; г – агрегата літака

За наявності дистанційних лінійок (рисунок 2.16, а) і спеціальної системи лазерного прив'язування довжина вимірювання може досягати 10 м зі збільшенням похибки вимірювання до $\pm 0,25$ мм.

Замість контактного щупа ВГ може застосовувати лазерну насадку для безконтактного «зворотного інжинірингу» (рисунок 2.16, б).



а



б

Рисунок 2.16 – Приклади розширення можливостей мобільних KBM

За координатами даних точок комп'ютер здатний побудувати будь-які геометричні примітиви з їх реальними розмірами, положенням щодо базових поверхонь виробу та взаємним розташуванням елементів відносно один одного. Саме це дає змогу проконтролювати необхідний лінійний чи кутовий розмір, зазначений у кресленні, а також відхилення розташування поверхонь.

Контроль складних криволінійних поверхонь здійснюється методом порівняння з вихідною CAD-моделлю об'єкта контролю. За допомогою програмного забезпечення оператор віртуально накладає реальний виріб на еталонну CAD-модель, що дозволяє в режимі реального часу контролювати ступінь відхилення.

За допомогою мобільних KBM досить просто контролюють відхилення теоретичних обводів рубильників складальної оснастки. За еталон, щодо якого проводять вимірювання відхилень, приймають електронну модель стапеля. Файл звіту автоматично формується в графічному або табличному вигляді. Однією з переваг є можливість зіставлення деталі й електронного макета (математичної моделі) за безліччю довільних точок, вибраних на фізичній моделі, та подальша оптимізація методом послідовних наближень.

Контрольні запитання

- 1 Надайте поняття координатних вимірювань, охарактеризуйте основну процедуру при всіх вимірюваннях, що здійснюються за допомогою KBM.
- 2 Які операції поєднує координатне вимірювання на верстатах із ЧПК? Як це відтворюється?
- 3 Як здійснюється контроль траєкторії руху інструмента?
- 4 Яка найважливіша функція постпроцесора?
- 5 Які Ви знаєте компонування KBM? Чим вони відрізняються?

3 КОМП'ЮТЕРИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КООРДИНАТНИХ ВИМІРЮВАНЬ

Суттєві зміни відбулися в підвищенні складності вирішення метрологічних завдань, алгоритмічному й програмному забезпеченнях КВМ і наочності подання результатів вимірювань.

Комп'ютеризація інженерних завдань – один із основних шляхів підвищення конкурентоспроможності продукції будь-якого машинобудівного підприємства незалежно від типу виробництва.

Ключовим моментом сучасного етапу виробництва є перехід від дискретного до електронного опису виробу (ЕОВ).

Основою ЕОВ є безпаперове подання інформаційної моделі виробу, що містить усі відомості про виріб із урахуванням міжнародних стандартів.

Основні компоненти ЕОВ:

- комплекс програмних засобів для автоматизованого проектування виробів CAD (Computer Aided Design);
- система автоматизації технологічної підготовки виробництва CAM (Computer Aided Manufacturing);
- система інженерного аналізу CAE (Computer Aided Engineering);
- комп'ютерна система координатних вимірювань CAI (Computer Aided Inspection).

На підприємствах аерокосмічної галузі як базові засоби комп'ютерних інтегрованих технологій використовують системи високого рівня Unigraphics, CATIA, CADD5-5, EUCLID та ін.

3.1 Програмне забезпечення Power INSPECT

Розробником спеціалізованого програмного забезпечення для комп'ютерних CAI-систем контролю є компанія Delcam (Англія).

Для порівняння фактичної форми деталі з теоретичною комп'ютерною CAD-моделлю Delcam пропонує CAI-систему Power INSPECT.

Power INSPECT може підтримувати роботу з широким спектром координатно-вимірювального обладнання різних виробників і типів, у тому числі стаціонарні КВМ із ЧПК, мобільні КВМ, лазерні 3D-сканери, оптичні вимірювальні комплекси та ін.

Програмне забезпечення Power INSPECT створює умови для роботи стаціонарних і мобільних КВМ у трьох режимах:

- порівняння результатів вимірювання з комп'ютерної математичною моделлю виробу;
- проведення традиційних геометричних вимірювань;
- проведення реінжинірингу – створення математичної моделі шляхом сканування поверхні реального виробу.

У процесі вимірювань на моніторі комп'ютера негайно відображається широкий спектр допоміжної інформації, наприклад номінальний розмір і його фактичне відхилення.

У версії Power INSPECT 2013 R2 доданий метод контролю контуру

кромок листових деталей і виробів з композиційних матеріалів (КМ) у два дотики.

Перше вимірювання виконують на формоутворюючій поверхні деталі поблизу кромки, що вимірюється. Друге вимірювання проводять безпосередньо на кромці, після чого істинний розмір кромки деталі автоматично обчислюється на основі координат центру щупа та його діаметра.

При створенні послідовностей вимірювань для стаціонарних КВМ із ЧПК і верстатів із ЧПК, оснащених ВГ, дуже важливо забезпечити безпечність переміщення виконавчих органів обладнання, оскільки будь-які зіткнення загрожують дорогими поломками.

Для тривимірної симуляції процесу виконання вимірювань у програмі Power INSPECT використовують точні 3D-моделі КВМ, щупа ВГ, кріпильної оснастки та CAD-моделей деталей (рисунок 3.1).

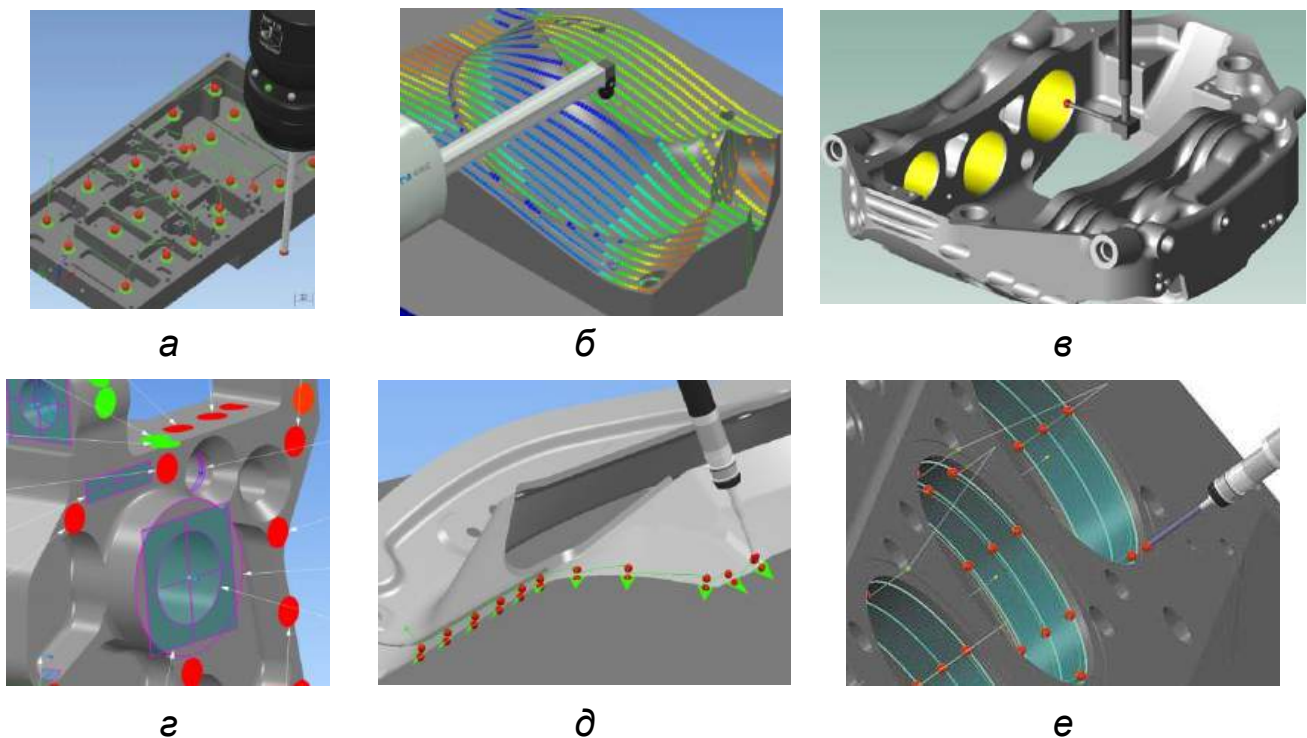


Рисунок 3.1 – Комп'ютерна симуляція:

- а – точкового позиціонування; б – сканування; в – центрування;
- г – системи координат; д – вимірювання контуру на листовій деталі;
- е – контроль циліндричності отворів

При комп'ютерній симуляції користувач має можливість прискорювати або сповільнювати процес, візуально спостерігати за процесом геометричного контролю, щоб виключити можливі зіткнення вимірювального щупа з елементами технологічної оснастки.

Програма контролю розмірів і допусків GD&T (Geometric dimensioning and tolerancing) створює стандартизовані для всіх користувачів формуляри метрологічного контролю з використанням наочних символів і кольорових шкал відхилень (рисунок 3.2).

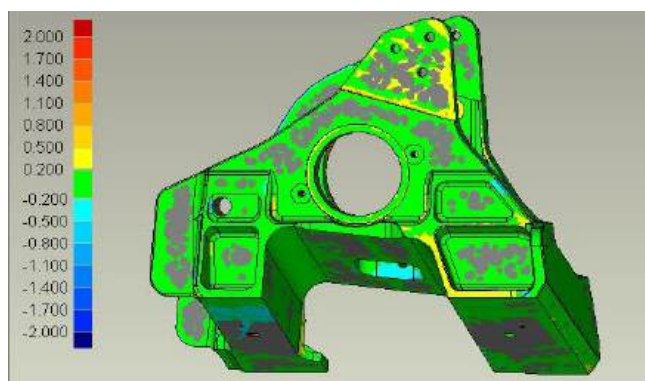


Рисунок 3.2 – Кольорова шкала відхилень форми поверхні

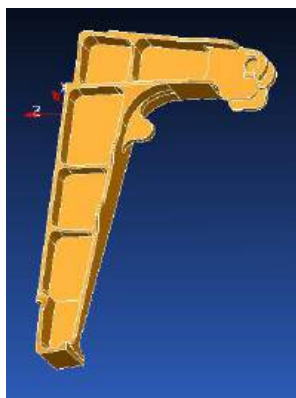
Програма Power SHAPE – гібридний пакет для 3D-моделювання формуютьчих поверхонь для проектування прес-форм, штампів і електродів для електроерозійної обробки.

3.2 Методика виконання координатних вимірювань

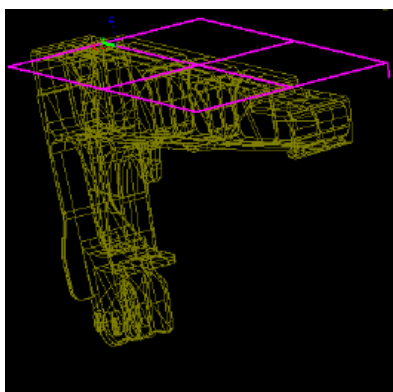
Для виконання координатних вимірювань існує певний алгоритм послідовних дій:

1. Опрацювання конструкторської та технічної документації на об'єкт контролю.
2. Вибір засобу для виконання координатних вимірювань.
3. Вивчення особливостей математичної моделі об'єкта контролю.
4. Розроблення схеми базування та закріплення об'єкта контролю та засоби для виконання координатних вимірювань.
5. Розроблення алгоритму та стратегії вимірювань.
6. Безпосереднє виконання операції контролю.

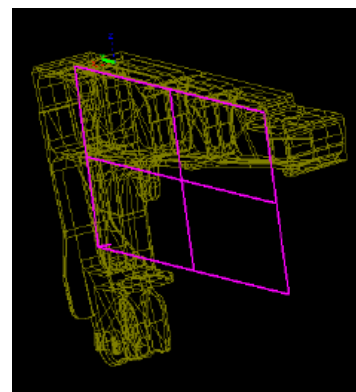
Перед початком вимірювання необхідно прив'язати систему координат деталі до системи координат мобільної KBM (рисунок 3.3).



а



б



в

Рисунок 3.3 – Модель кронштейна навішування закріпка (а) та прив'язування системи координат деталі KBM (б, в)

Далі наведені характерні для сучасного вітчизняного авіабудування приклади координатних вимірювань за допомогою мобільної KBM моделі Arm Sigma 2030 компанії ROMER (США).

Сталеву оправку для листового штампування двох половинок обтіч (рисунок 3.4) необхідно перевірити на відповідність математичній моделі та також нанести відсутню розмітку ліній обрізу.

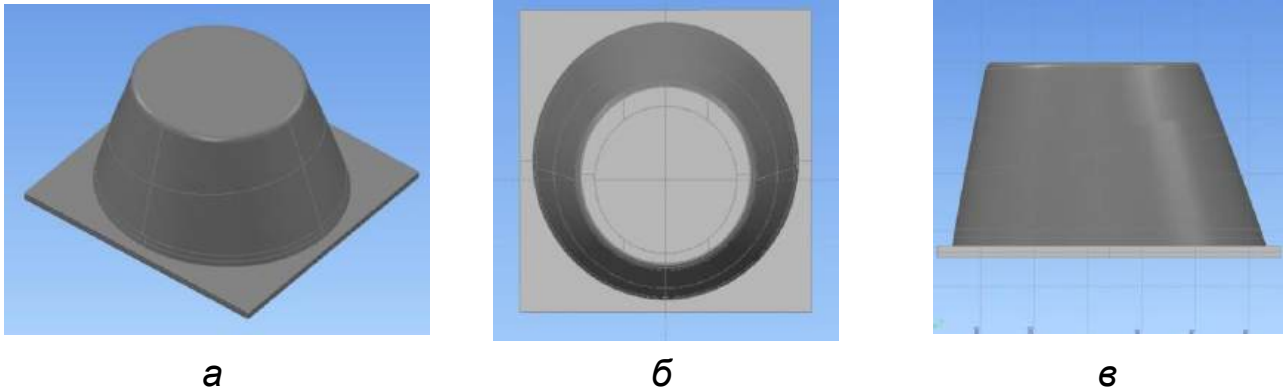


Рисунок 3.4 – Твердотільна модель (а) і проєкції (б, в) оправки

Оправка має форму неправильного зрізаного конуса з габаритними розмірами 650 × 650 × 350 мм і масою близько 50 кг.

В алгоритмі процесу підготовки математичної моделі оправки до етапу контролю необхідно вибрати систему координат, яку надалі можна буде визначити в реальному масштабі часу за допомогою геометричних елементів на самій оправці (рисунок 3.5, а). Цю операцію виконують на базі програми Power SHAPE, яка входить до комплексу поставки KBM моделі Arm Sigma 2030.

Контроль положення розмітки на оправці виконують шляхом візуального порівняння дійсного положення розмітки на оправці з теоретичним на математичній моделі (рисунок 3.5, б).

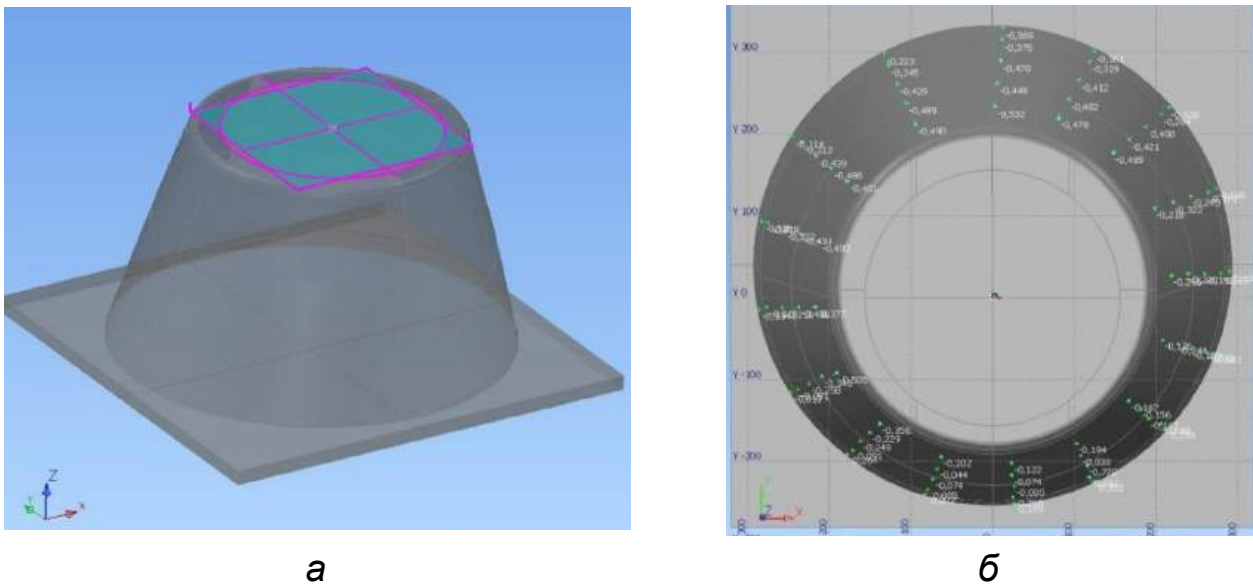


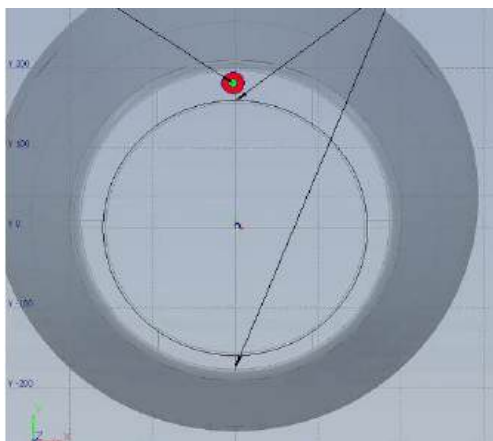
Рисунок 3.5 – Комп'ютерна модель оправки після виконання базування (а) та контролю поверхні бічної стінки (б)

При розробленні стратегії геометричного контролю поверхню оправки для зручності візуалізації доречно розбити на три підгрупи: поверхня бічної стінки, верхня площина та заокруглення.

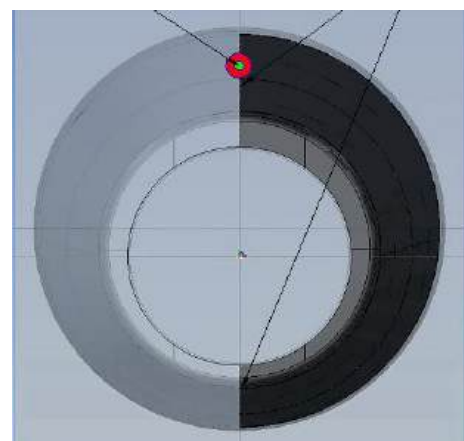
Перед початком контролю проводять ініціалізацію мобільної КВМ. Об'єкт, що вимірюється, за замовчуванням поміщають на робочому столі програми Power Inspect в системі координат КВМ.

Процедуру базування виконують із використанням вимірних елементів на оправці за допомогою устанавлення елементів прив'язування у вікні базування. Після виконання процедури базування в реальному масштабі часу виконують безпосередній візуальний контроль поверхні оправки за її математичною моделлю на екрані монітора комп'ютера.

Відсутню точкову розмітку ліній обрізу на оправці виробляють насадкою з ударним кернером, який входить у штатний комплект оснащення мобільної КВМ. Розташування точок розмітки та контур обрізу деталі контролюють на екрані монітора комп'ютера (рисунок 3.6).



а



б

Рисунок 3.6 – Контроль положення ліній розмітки (а) та контуру обрізу правої частини обтічника на оправці (б)

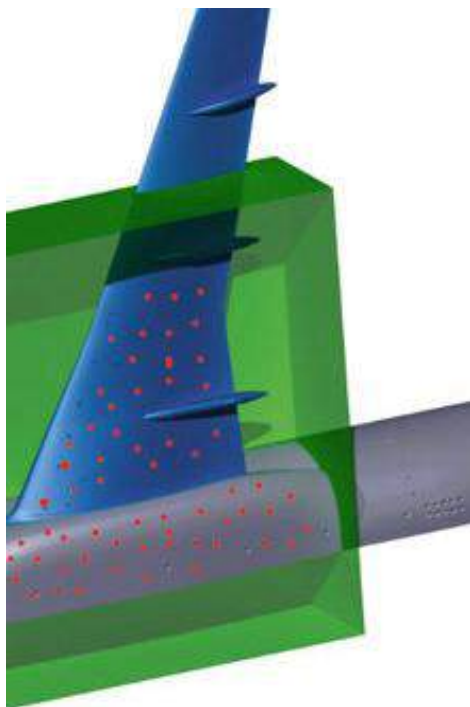
Для закріплення оправки на контрольному столі використовують швидкозатискні струбцини з прогумованими губками для виключення можливості пошкодження його поверхні. Мобільну КВМ устанавлюють на контрольному столі за допомогою магнітної підставки з адаптером.

3.2.2. Контроль аеродинамічної продувної моделі

Контроль геометричних параметрів аеродинамічних продувних моделей виконують на основі зіставлення координат вимірних точок реальної поверхні з координатами відповідних точок математичної моделі (рисунок 3.7, а).

У результаті зіставлення встановлюють фактичні відхилення геометричних параметрів від теоретичних, які задані математичною моделлю. Відхилення зводять до прийнятих для агрегатів і продувних моделей систем координат.

Для оцінки похибки базування продувної моделі на станині в аеродинамічній трубі виконують вимірювання зон на фюзеляжі та крилі, які доступні при одному встановленні KBM (рисунок 3.7, б).



а



б

Рисунок 3.7 – Моделювання зони доступності та контроль продувної моделі за допомогою мобільної KBM

На аеродинамічній продувній моделі контролюють такі геометричні параметри:

- кутові похибки базування продувної моделі на фермовій станині в аеродинамічній трубі $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$, $\Delta\gamma$;
- похибки установлення моделі щодо її положення в математичній моделі робочої зони аеродинамічної труби ΔX , ΔY , $\Delta\alpha$;
- похибки геометричного або аеродинамічного скручування контрольних перерізів агрегатів із аеродинамічним профілем (крило, оперення, лопать гвинта вертольота) $\Delta\alpha_i$;
- похибка контуру контрольних перерізів продувної моделі.

3.2.3 Реінжиніринг методом контактних вимірювань

Для сучасного авіабудування є дуже цікавою технологія зворотного моделювання – реінжиніринг. Суть процесу реінжинірингу полягає в побудові математичної моделі виробу, вже існуючого фізично, шляхом контактного або безконтактного сканування його поверхні.

Нижче розглянуто методику виконання реінжинірингу шляхом контактного сканування поверхні форми для виклеювання за допомогою мобільної KBM моделі Arm Sigma 2030 компанії ROMER (США).

Об'єкт контактного реінжинірингу – форма для виклеювання для автоклавного формування кришки контейнера з КМ (рисунок 3.7).



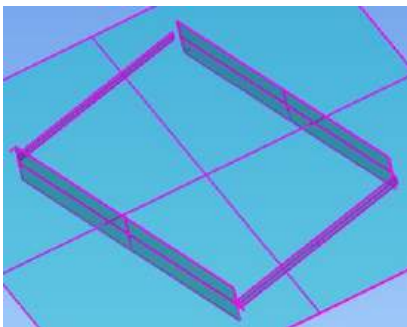
Рисунок 3.7 – Загальний вигляд форми для виклеювання кришки з КМ

Обвід форми для виклеювання містить набір площин і поверхонь одинарної (конус) та подвійної кривизни. Форма для виклеювання має габаритні розміри $170 \times 120 \times 50$ мм і масу близько 2 кг.

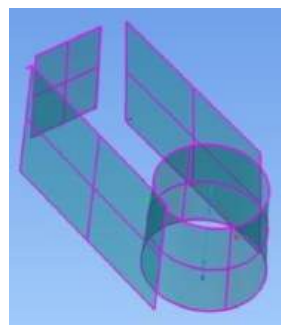
Реінжиніринг форми для виклеювання буде здійснюватися за допомогою програми Power SHAPE – гібридного пакета для моделювання формоутворюючих поверхонь для проектування прес-форм.

У стратегію контактного сканування підставки та бічної поверхні форми для виклеювання будуть входити стандартні геометричні елементи – площина й усічений конус (рисунок 3.8, а, б).

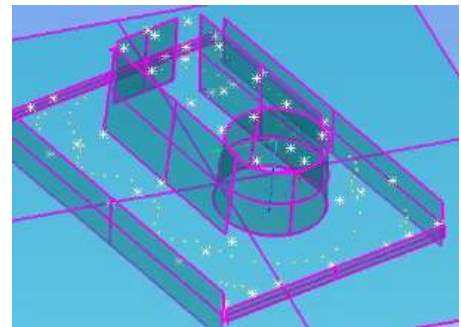
Стратегія контактного сканування верхньої та нижньої поверхонь передбачить вимір масиву окремих точок координатної сітки, оскільки ці поверхні мають подвійну кривизну та їх визначення за допомогою стандартних геометричних елементів досить важке (рисунок 3.8, в).



а



б



в

Рисунок 3.8 – Стратегія сканування поверхонь форми для виклеювання

Стратегія сканування ліній обрізу контуру кришки містить етапи проведення вимірювань координат точок і підбору стандартних геометричних елементів.

Для забезпечення максимального доступу вимірювального щупа до поверхні форми необхідно розробити схему її базування та закріплення на робочому столі (рисунок 3.9).

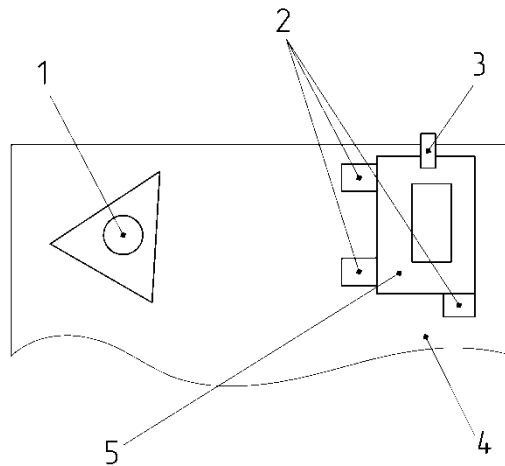
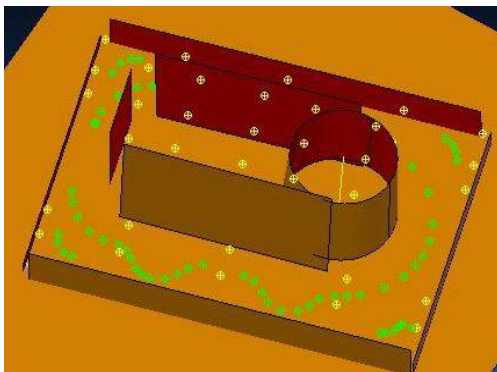


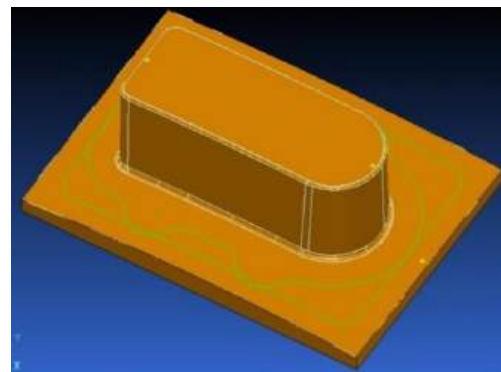
Рисунок 3.9 – Схема розташування мобільної КВМ і форми для виклеювання на контрольному столі: 1 – мобільна КВМ; 2 – електромагнітні упори; 3 – струбцина; 4 – робочий стіл; 5 – форма для виклеювання

Після виконання контактного сканування дані геометричних вимірювань експортують у програму моделювання технологічної оснастки Power SHAPE і виконують видалення допоміжних геометричних елементів (рисунок 3.10, а).

Результатом роботи програми Power SHAPE є математична модель поверхні форми для виклеювання з лініями обрізу контуру композитної кришки (рисунок 3.10, б).



а



б

Рисунок 3.10 – Створення математичної моделі форми для виклеювання

Безпосередньо перед виконанням контактної реінжинірингу робоча поверхня форми для виклеювання має бути очищена від залишків антиадгезійного мастила, знежирена та висушена.

Контрольні запитання

1. Охарактеризуйте поняття «електронний опис виробу» та наведіть його основні компоненти.
2. Назвіть різницю між контролем розмірів і допусків деталей програмою Power INSPECT та програмою GD&T?
3. Надайте алгоритм методики виконання координатних вимірювань.
4. В чому суть зворотного моделювання – реінжинірингу?

4 ТЕХНОЛОГІЯ РЕІНЖІНІРИНГУ ПРОМИСЛОВИХ ВИРОБІВ

Під терміном «реінжиніринг» (Reverse Engineering) розуміється комплекс методів, технологій і устаткування для реалізації схеми «ідея – макет – виріб» на відміну від звичної для інженера схеми «ідея – креслення – виріб» (рисунок 4.1).

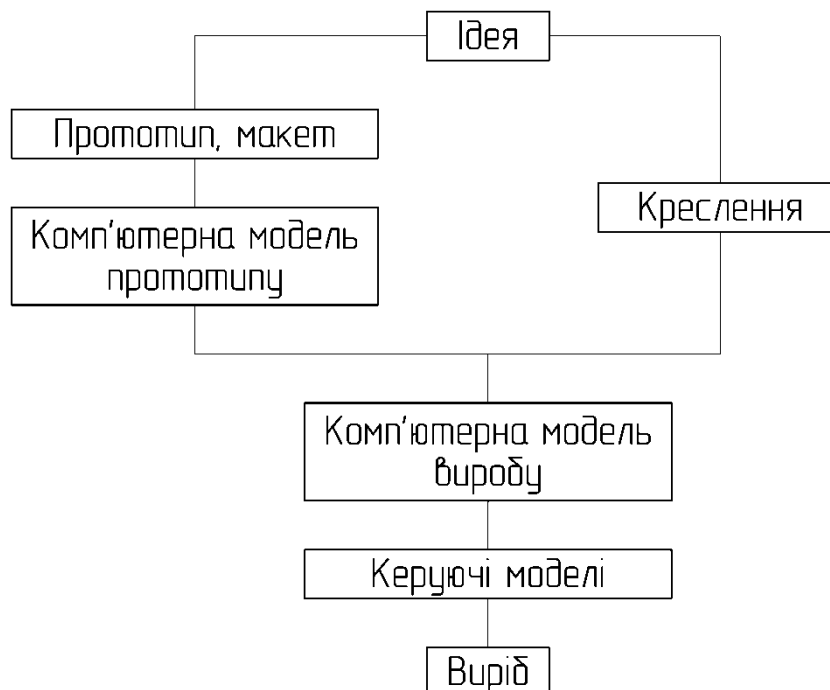


Рисунок 4.1 – Схема традиційного проектування та реінжинірингу

Метою реінжинірингу є отримання математичної моделі на основі вимірювання реального об'єкта.

Реінжиніринг може ефективно вирішити такі завдання:

- копіювання сучасних машинобудівних виробів або їх фрагментів;
- модифікація застарілих вузлів та агрегатів;
- виготовлення виробів з промисловим або дизайнерським прототипом, створеним за допомогою ручної праці;
- розроблення нових виробів на основі детального конструкторського аналізу аналогічних промислових прототипів;
- відтворення скульптур і архітектури, що мають історичну цінність.

Підсумковим результатом процесу реінжинірингу є комплект конструкторської документації та 3D-модель об'єкта в форматі системи автоматизованого проектування підприємства.

4.1 Типові етапи процесу реінжинірингу

Процес реінжинірингу містить такі типові етапи:

- оцифрування прототипу виробу;
- оброблення оцифрованих даних і підготовка комп'ютерної моделі прототипу виробу;
- конструкторсько-технологічне опрацювання виробу на основі отриманої комп'ютерної моделі;

– розроблення керуючих програм для обладнання із ЧПК на основі отриманої комп'ютерної моделі;

– виготовлення виробу або оснастки на обладнанні із ЧПК.

Метою реінжинірингу є отримання математичної моделі на основі вимірювання реального об'єкта (рисунок 4.2).

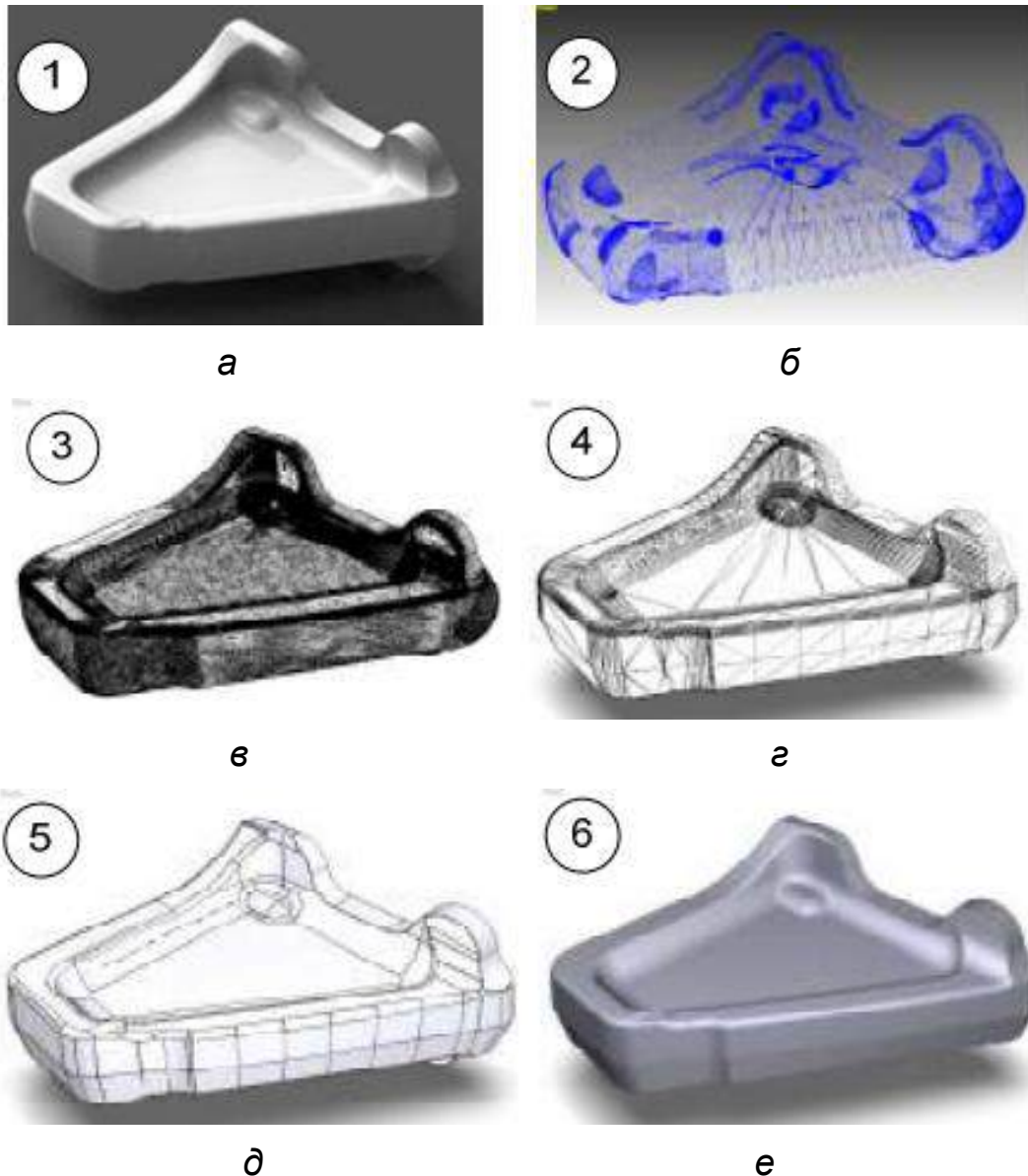


Рисунок 4.2 – Етапи реінжинірингу промислового виробу:
а – виріб; б – хмара точок; в – вихідна тріангуляційна модель;
г – тріангуляційна модель після редагування; д – модель
з NURBS-поверхнею; е – CAD-модель

Маючи широке практичне застосування, реінжиніринг потребує наукового підходу до його вивчення для вирішення ряду проблем: обґрунтованого вибору методу реінжинірингу, обладнання та програмного забезпечення з урахуванням особливостей промислових виробів.

Потреба виготовлення в автомобільній і авіаційній промисловості виробів із складними обводами призвела до виникнення апарату сплайнової

геометрії. Найбільш вдалим описом складних форм об'єктів виробництва виявилися параметричні сплайни NURBS (Non-uniform rational B-spline), розробниками яких є французи П'єр Безьє, інженер і математик з компанії Renault, і Поль де Кастельє, співробітник компанії Citroën. Криві Безьє лягли в основу поверхонь Безьє, які відповідають умовам формування поверхонь об'єктів виробництва, що сприяло їх застосуванню в багатьох сучасних інтегрованих CAD/CAM-системах.

4.2 Методи реінжинірингу промислових виробів

Кінцевим результатом роботи 3D-сканера є хмара точок, яка являє собою набір просторових координат поверхні певного об'єкта, визначених з певною точністю в певній координатній системі.

Оскільки результатом робіт є цифрова модель реального фізичного об'єкта, то ми можемо свідчити про обернений інжиніринг цього предмета. Обернений інжиніринг являє собою повний аналіз певного об'єкта з метою його відтворення як в цифровій, так і у фізичній формі (реплікації) за допомогою верстата чи 3D-принтера. Це в багатьох випадках необхідно для вивчення принципу роботи об'єкта сканування та вдосконалення його конструкції. Отже, 3D-сканування є однією з основних ланок реінжинірингу.

Як уже зазначалося, сканування проводять з різною метою на різних об'єктах. Для забезпечення повноцінної роботи створено різні типи сканерів, які класифікують за певними ознаками (рисунок 4.3).

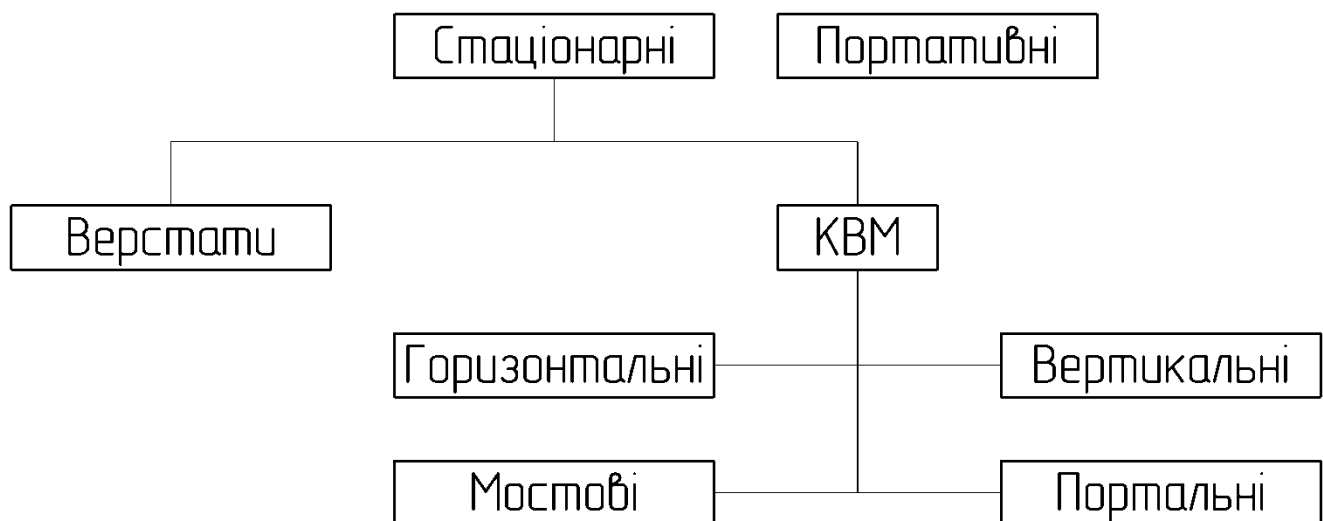


Рисунок 4.3 – Класифікація 3D-сканерів за способом установа

Сканери класифікують за способом установа сканера й досліджуваного об'єкта та технологією сканування.

Спосіб установа сканера залежить від габаритних розмірів самого приладу. На основі цього їх можна поділити на стационарні та портативні.

До стационарних 3D-сканерів належать верстати із ЧПК, які використовують для реплікації, та координатно-вимірювальні машини.

Особливістю стаціонарних сканерів є те, що для сканування досліджуваного об'єкта необхідно доставити до самого приладу. Це не завжди зручно та можливо. Тому для цього створені та використовуються портативні сканери, які відзначаються мобільністю в транспортуванні. Серед представників цієї групи є КВМ типу «рука», ручні сканери та інші.

Основою наведеної вище класифікації 3D-сканерів є порівняльний аналіз їхніх конструктивних особливостей та мобільності. Але разом із цими показниками необхідно розділяти сканери й за методом збирання інформації, що, в принципі, є однією з основних характеристик цих приладів.

Усі 3D-сканери за методом збирання інформації поділяють на контактні й безконтактні (рисунок 4.4).



Рисунок 4.4 – Класифікація 3D-сканерів за технологією сканування

Контактними називають сканери, які для визначення координат точок використовують спеціальний щуп, що безпосередньо механічним способом торкається до досліджуваного об'єкта. Точці дотику щупа та поверхні присвоюють відповідні координати.

Оскільки під час такого сканування в цифровий формат переводять лише вибрані оператором точки, що не завжди дає змогу повністю й достовірно відтворити форму досліджуваного об'єкта, то такий процес варто називати оцифруванням. Усі контактні 3D-сканери мають бути встановлені на КВМ або верстат із ЧПК.

Безконтактні сканери на відміну від контактних визначають координати фізичної моделі на певній відстані від неї за допомогою випромінювання. Залежно від джерела випромінювання дистанційні сканери поділяють на пасивні та активні.

Пасивні 3D-сканери визначають просторові координати точок на основі відображеного навколишнього випромінювання. Оскільки джерелом інформації для пасивних сканерів є знімки, створені за допомогою цифрових фотокамер, то цю технологію можна назвати оптичною, а процес перетворення фізичного об'єкта на електронний – оцифруванням.

Методи створення фотозображень, хоча й дуже подібні, але дещо відрізняються. Тому ці прилади поділяють на стереоскопічні, фотограмметричні та сканери описування силуету.

Стереоскопічні сканери відтворюють принцип роботи зору людини – дві паралельно розміщені камери фіксують зображення в один момент часу. Фотограмметричні фіксують зображення предмета з різних сторін і під різним кутом. Сканування на основі фотограмметрії являє собою фотографування вихідного об'єкта з різних ракурсів і відтворення на основі отриманих зображень тривимірної моделі.

Принцип роботи сканерів опису силуету полягає у виділенні об'єкта сканування на тлі контрастного фону (здебільшого синього).

У більшості пасивних 3D-сканерів для захоплення зображення можна застосувати будь-яку цифрову фотокамеру. Отже, залежно від параметрів фотокамери буде визначатися точність. Але власне створенням просторових моделей займається програмна частина, яка є головною передумовою побудови якісних поверхонь.

Найпоширенішими та найуживанішими є 3D-сканери, які в процесі сканування випромінюють певні хвилі й належать до групи активних сканерів. Залежно від використаних хвиль і застосування самих приладів активні 3D-сканери класифікують за схемою, зображеною на рисунку 4.5.

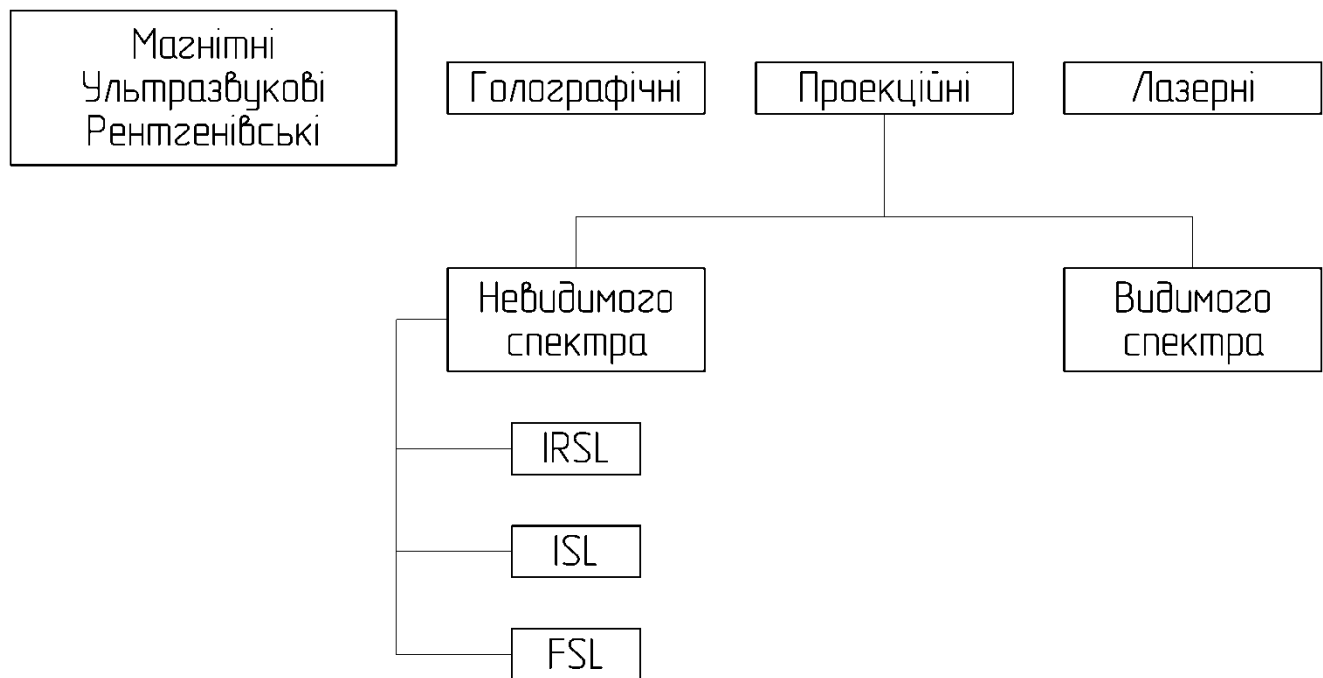


Рисунок 4.5 – Класифікація активних 3D-сканерів

Особливістю магнітних, ультразвукових чи рентгенівських 3D-сканерів є здатність хвилі, що випромінюється, проникати всередину об'єкта. Сканери цього типу використовують у медицині для побудови просторової моделі внутрішніх органів людини в режимі реального часу. Сканери із застосуванням технології голографії поки що є малопоширеними.

Принцип роботи проекційних 3D-сканерів полягає в освітленні об'єкта сканування світловими імпульсами або нанесенні певного світлового візерунка у вигляді сітки, смуг тощо. Залежно від рельєфу об'єкта світлове зображення спотворюватиметься. Саме на основі цих спотворень визначають просторові координати поверхні об'єкта. Захоплення сканером проектного світла забезпечує спеціальна оптична камера, через що цей тип сканерів часто називають оптичним. Джерелом генерації світла на поверхні об'єкта може бути галогенна лампа чи лазерний світлодіод.

Створення світлового візерунка досягається за допомогою проектора (із застосуванням галогенної лампи) чи перехрестям лазерних променів.

Сканери із застосуванням проектування білого світла (галогенні лампи) можуть використовуватися для сканування людини, оскільки випромінюване світло є безпечним для зору.

Перераховані сканери на основі структурованого та модульованого світла в класифікації належать до сканерів із видимим спектром випромінюваного світла.

Можна застосовувати під час сканування й невидимий спектр випромінювання. Невидимість досягається використанням інфрачервоного світла (IRSL), високочастотного проектування (ISL) чи спеціального фільтра (FSL).

Ще одним типом дистанційних 3D-сканерів є лазерні сканери. Використання лазера визначає застосування імпульсного, фазового чи тріангуляційного методу визначення відстані до певної точки.

Залежно від потужності лазера, чутливості приймача та методу збирання інформації лазерні 3D-сканери мають різні радіуси дії: ближній (до 1,5 м), середній (від 1,5 до 150 м) та дальній (понад 150 до 1000 м).

Сканери із середнім і дальнім радіусами дії використовують як імпульсний, так і фазовий методи визначення відстані. Точність визначення координат точок є нижчою порівняно з іншими сканерами, але це компенсується їх обширною зоною дії.

Наприклад, FARO Laser Scanner Focus 3D у разі діапазону роботи 150 м дає можливість сканувати з точністю до ± 2 мм.

До лазерних сканерів з невеликою дальністю дії належать також ручні сканери. Їх переважно застосовують для сканування порівняно невеликих об'єктів. Особливістю їх роботи переважно є перегляд поверхні, що сканується, у режимі реального часу. Отже, під'єднаний до пристрою комп'ютер одразу показує відскановану приладом область у робочому вікні програмного забезпечення. До того ж вони відзначаються високою точністю: наприклад, ZScanner 800 дає результати з точністю до $\pm 0,050$ мм.

4.3 Лазерне сканування промислових виробів

4.3.1 Принцип триангуляції лазерного сканування

В основу лазерного сканування покладено принцип оптичної триангуляції. Випромінювання напівпровідникового лазера 1 з фокусом X проектується об'єктивом 2 на поверхню об'єкта 6. Розсіяне на поверхні об'єкта лазерне випромінювання об'єктивом 3 збирається на світлоприймальній матриці 4. Процесор сигналів 5 розраховує відстань L до нової позиції 7 об'єкта за розташуванням зображення світлової плями з максимальною інтенсивністю на матриці 4 (рисунок 4.6, а).

Вертикальний зсув лазерної лінії на поверхні змінює її дистанційне розташування на світлоприймальній матриці (рисунок 4.6, б).

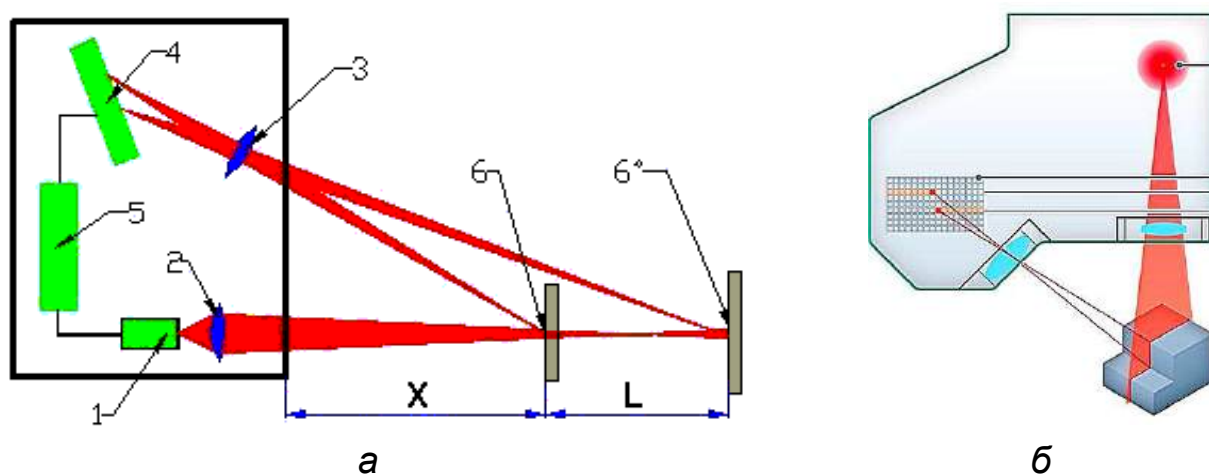


Рисунок 4.6 – Схема триангуляційного принципу визначення відстані

На рисунку 4.7 показані схеми оптичної головки та триангуляції лазерної лінії

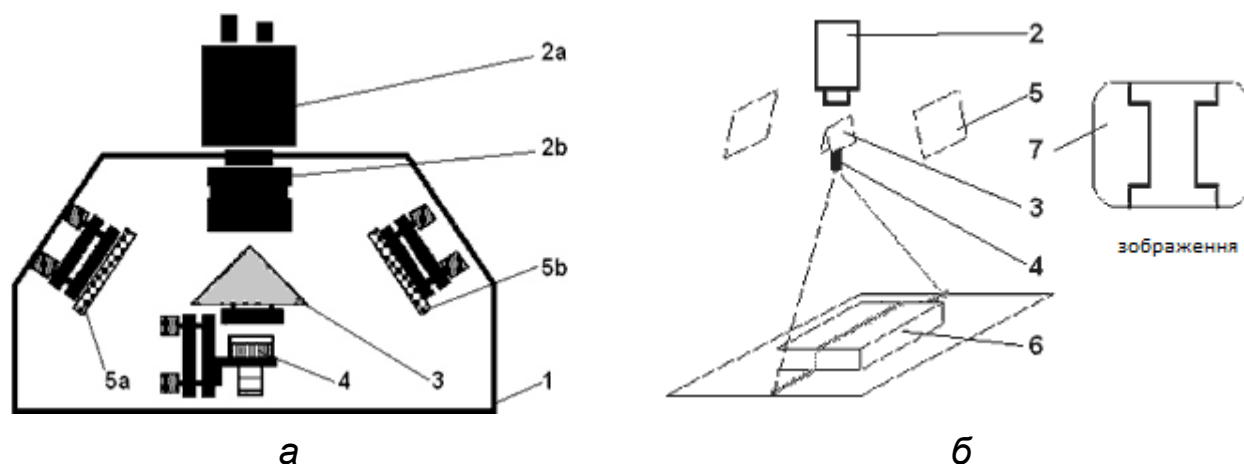


Рисунок 4.7 – Схеми оптичної головки (а) та триангуляції лазерної лінії (б)

Оптична головка лазерного сканера (рисунок 4.7, а) складається з корпусу 1, оптичного датчика 2, що містить цифрову камеру 2а та системи лінз 2b, призми 3, генератора лазерної лінії 4 і дзеркал 5а і 5b.

Застосування в конструкції оптичної головки двох протилежних дзеркал 5a і 5b дозволяє зменшити можливість виникнення тіньових областей.

Тіньові області виникають у тому випадку, коли слід лазерної лінії є непомітним під таким кутом через різкі висотні перепади форми поверхні зразка. Таким чином, якщо одне із зображень відсутнє, то комп'ютерна модель розраховується інакше. Якщо є обидва зображення, то для виключення багатозначності даних у точці результативним значенням приймають середнє.

Робота оптичного датчика (рисунок 4.7, б) основана на принципі триангуляції лазерної лінії. Генератор лазерної лінії 4 проектує її на об'єкт 6. Оптичний образ лінії знімається під деяким кутом дзеркалами 5 і передається через призму 3 в датчик 2. Таким чином, висотні зміни об'єкта сканування перетворюються на зміни форми лінії оптичного образу 7. Лазерний промінь може бути циліндричним діаметром близько 2 мм або віялоподібним. У першому випадку на об'єкті, що вимірюється, видно червону пляму, у другому – червону вузьку смугу довжиною приблизно 100 мм. Така конструкція дуже зручна при ручному скануванні великих поверхонь.

Генератор лазерної лінії призначений для створення яскравого вузького лазерного променя й проектування його на поверхню об'єкта сканування (рисунок 4.8).

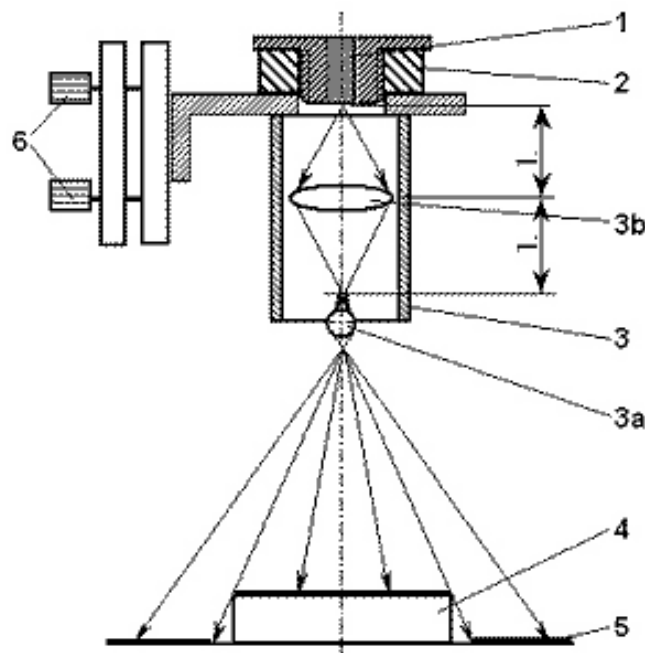


Рисунок 4.8 – Схема генератора лазерної лінії

Як джерело монохроматичного випромінювання в генераторі використовують імпульсний напівпровідниковий лазер 1 з довжиною хвилі випромінювання 660 нм (червоний спектр) і потужністю 5 мВт. Пучок лазерного випромінювання перетворюється на віялоподібну світлову площину за допомогою системи лінз в об'єктиві 3. Товщину лазерної лінії 5 на об'єкті 4 визначають діаметром світлового пучка, що падає на лінзу 3b, і регулюють за допомогою зміни відстані l обертанням регулювальної гайки 2. Напря-

мок лазерної лінії та кут падіння пучка світла регулюють гвинтами 6. Довжина лазерної лінії обмежується ступенем відхилення лазерного променя лінзою 3а. Найбільш яскрава ділянка довжиною до 100 мм залишається в центрі лазерної лінії.

Зображення з фотокамери піддаються фільтрації за ступенем яскравості, після чого в зображенні залишаються тільки точки, що належать лазерній лінії. Якщо поріг чутливості недостатньо високий і товщина лінії більше, ніж одна точка, остаточне положення лінії визначається математично методом усереднення. Із даних точок із максимальною інтенсивністю світіння формується хмара точок.

Похибки зображення при лазерному скануванні нейтралізуються за допомогою програмного забезпечення, а зміна освітленості поглинається високочутливим фільтром денного світла. Лазерні сканери здатні генерувати випромінювання з частотою від 20 до 30 кГц.

У таблиці 4.1 наведені основні технічні характеристики лазерних датчиків для безконтактного вимірювання й контролю положення, розмірів, профілю поверхні технологічних об'єктів.

Таблиця 4.1 – Технічні характеристики лазерних датчиків SK600

Параметр	Модель		
	250/300	300/500	230/600
Базова відстань X, мм	250	300	230
Діапазон L, мм	300	500	600
Похибка	$\pm 0,1$ % від діапазону		
Роздільна здатність	0,01 % від діапазону		
Частота генерації, Гц	2000		
Потужність лазера, мВт	5		
Довжина хвилі, нм	660		
Живлення, В	12		
Споживана потужність, Вт	2		
Клас захисту	IP67		
Робоча температура, °C	- 10 ... + 60		
Габаритні розміри, мм	63x170x30		
Маса (без кабелю), кг	0,5		

Серія містить два модельних ряди: SK603 – швидкодіючі датчики з робочим діапазоном від 2 до 1000 мм, SK600 – датчики зі збільшеною базовою відстанню.

Лазерні сканери є альтернативою контактним датчикам для розширення метрологічних можливостей сучасних стаціонарних і мобільних КВМ, особливо при контролі дрібних і крихких деталей.

Лазерний сканер кріплять замість контактної щупи на КВМ стаціонарного (рисунок 4.9, а) або мобільного типу (рисунок 4.9, б).



а



б

Рисунок 4.9 – Розміщення лазерного сканера на стаціонарній (а) та мобільній (б) КВМ

Лазерний сканер моделі LC15 Dx фірми Nikon Metrology (Японія) сумісний з поворотно-обертальною головкою моделі PH10M англійської фірми Renishaw (рисунок 2.13, а).

До переваг лазерного 3D-сканування відноситься відсутність контакту з поверхнею, що вимірюється.

Недоліками є неможливість сканування машинобудівних об'єктів із великим ступенем світловідбивання або прозорості.

4.3.2 Ручне лазерне сканування

Весь обсяг даних лазерного сканування збирається комп'ютером, і на основі аналізу створюється карта точок тривимірного простору, яка після редагування перетворюється на триангуляційну модель об'єкта сканування (рисунок 4.2, а).

Далі спеціальне програмне забезпечення, використовуючи параметричні NURBS-сплайни для генерації кривих і поверхонь, створює тривимірну модель об'єкта сканування (рисунок 4.2, б).

Ручні лазерні сканери створюють 3D-зображення об'єкта за принципом триангуляції, описаним вище. Лазерний промінь або віялоподібна лазерна площа проектується на об'єкт із ручного джерела випромінювання, а координатно-чутливий детектор вимірює відстань до поверхні об'єкта. Сканер при ручному скануванні знаходиться в руці, місцезнаходження пристрою має бути точно визначено.

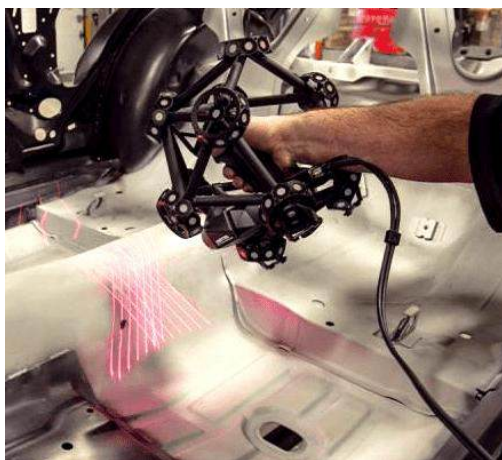
Це можна зробити за допомогою застосування базових елементів, що відбивають. Як такі елементи використовують мітки, які попередньо наклеюють на поверхню, що сканується (рисунок 4.10, а, б). Інший спосіб базується на фотограмметричному методі зовнішнього спостереження без використання міток на об'єкті (рисунок 4.10, в, г).



а



б



в



г

Рисунок 4.10 – Прив'язування ручного лазерного сканера до об'єкта

У таблиці 4.2 наведені основні технічні характеристики ручного 3D-сканера моделі HandySCAN 700 канадської компанії Creaform, який є базовим для двох методів прив'язування до об'єкта контролю (рисунок 4.10).

Таблиця 4.2 – Технічні характеристики сканера HandySCAN 700

Параметр	Значення
Маса, кг	1,1
Габаритні розміри, мм	122 x 77 x 294
Частота вимірювань, Гц	55000
Потужність лазера, мВт	5
Довжина хвилі, нм	660
Робоча відстань, мм	300
Глибина різкості, мм	250
Об'ємна точність, мм, мм/м	$\pm (0,02 + 0,06L)$
Зона сканування, мм	275 x 250
<i>Примітка.</i> Відповідно до стандарту ISO 10360 об'ємна точність визначається як значення, залежне від відстані L	

У разі застосування фотограмметричного методу зовнішнього спостереження три цифрові відеокамери фіксують геометричність руху сканера з шістьма степенями вільності в тривимірному просторі.

Дані ручного лазерного сканування обробляються комп'ютером у вигляді хмари точок тривимірного простору, які потім перетворюються в триангуляційну модель об'єкта контролю.

Потім створюється модель із NURBS-поверхонь. Ці дані поєднуються з інформацією від пасивних датчиків видимого спектра, які фіксують текстуру поверхні об'єкта контролю та її колір.

4.3.3 Тривимірний лазерний сканер

Принцип роботи тривимірного лазерного сканера полягає у вимірюванні часу проходження лазерного променя від випромінювача до поверхні, що відбиває, і назад до приймача. Шляхом ділення цього часу на швидкість поширення променя визначають відстань до об'єкта.

Сканер складається з лазерного далекоміра, адаптованого для роботи з високою частотою, і блока розгортки лазерного променя. Як блок розгортки в сканері виступають сервопривод і полігональне дзеркало або призма. Сервопривод відхиляє промінь на задану величину в горизонтальній площині, при цьому повертається вся верхня частина сканера, яка називається головою. Розгортка у вертикальній площині здійснюється шляхом обертання або гойдання дзеркала.

У процесі сканування фіксується напрямок поширення лазерного променя й відстань до точок об'єкта. Результатом роботи сканера є растрове зображення – скан, значення пікселів якого являють собою елементи вектора з такими компонентами: виміряною відстанню, інтенсивністю відбитого сигналу та складової, що характеризує реальний колір точки.

Іншою формою подання результатів наземного лазерного сканування є масив точок лазерних віддзеркалень від об'єктів, що знаходяться в полі зору сканера, з п'ятьма характеристиками, а саме просторовими координатами X , Y , Z , інтенсивністю і реальним кольором.

Тривимірний лазерний сканер вимірює відстані до всіх точок, координати яких необхідно визначити, за допомогою лазерного безвідбивного далекоміра. Вимірювання проводять із дуже високою швидкістю – кілька тисяч вимірювань в секунду. У лічені хвилини прилад вимірює мільйони точок, точно повторюючи поверхню об'єкта сканування. В результаті одного сеансу сканування утворюється хмара точок відображень лазерного променя.

Для реєстрації параметрів φ , ν , D і d кожної точки з певним інтервалом між ними та в заданих межах області сканування задається діапазон горизонтальних і вертикальних кутів і крок зміни цих кутів. Для кожної точки об'єкта реєструються горизонтальний φ та вертикальний ν кути за допомогою теодоліта, відстань D вимірюється лазерним далекоміром, а інтенсивність відбитого сигналу далекоміра d – сенсором (рисунок 4.11).

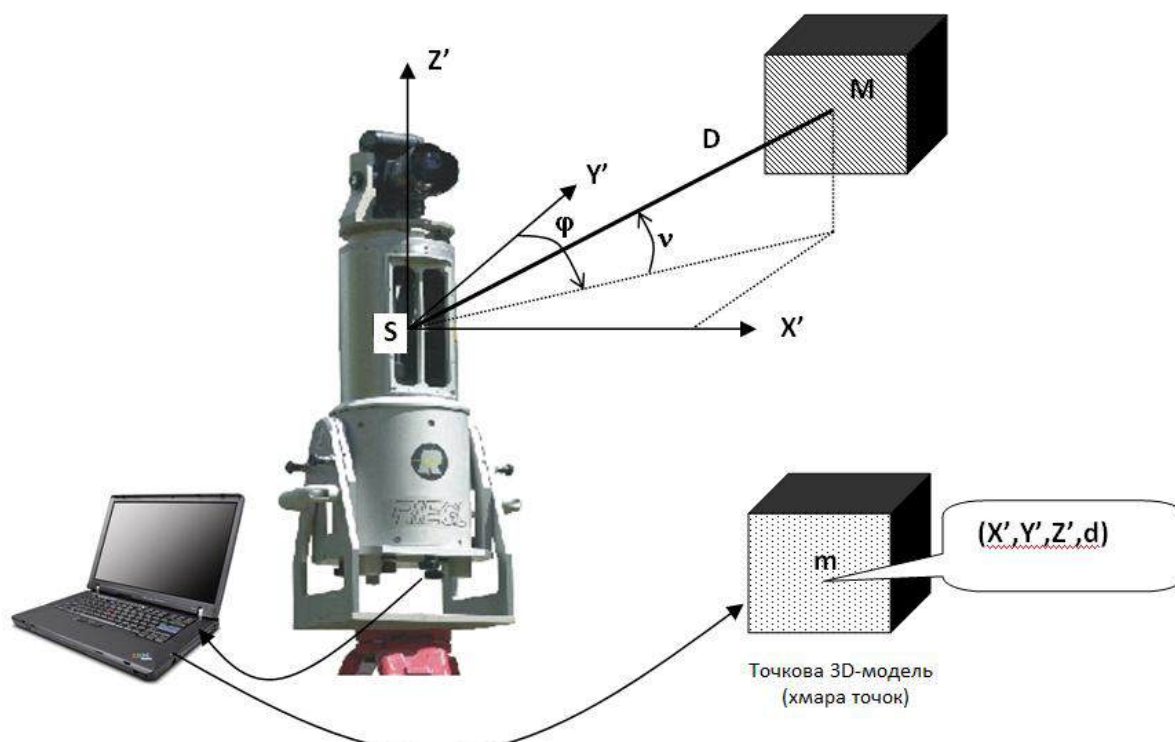


Рисунок 4.11 – Схема тривимірного лазерного сканера

Координати точок моделі об'єкта вимірюються в просторовій системі координат сканера $SX'Y'Z'$, яка пов'язана з системою відліків горизонтальних і вертикальних кутів тривимірного лазерного сканера.

В основу роботи лазерних далекомірів, що використовують у сканерах, покладені імпульсний і фазовий безвідбивні методи вимірювання відстаней, а також метод прямої кутової розгортки (триангуляційний метод).

Щоб зорієнтувати модель у просторі щодо системи координат об'єкта, потрібно виконати зовнішнє орієнтування моделі за опорними маркерами (рисунок 4.12, а, б). Для більш точного орієнтування базові мітки попередньо наклеюють на скановану поверхню (рисунок 4.12, в).

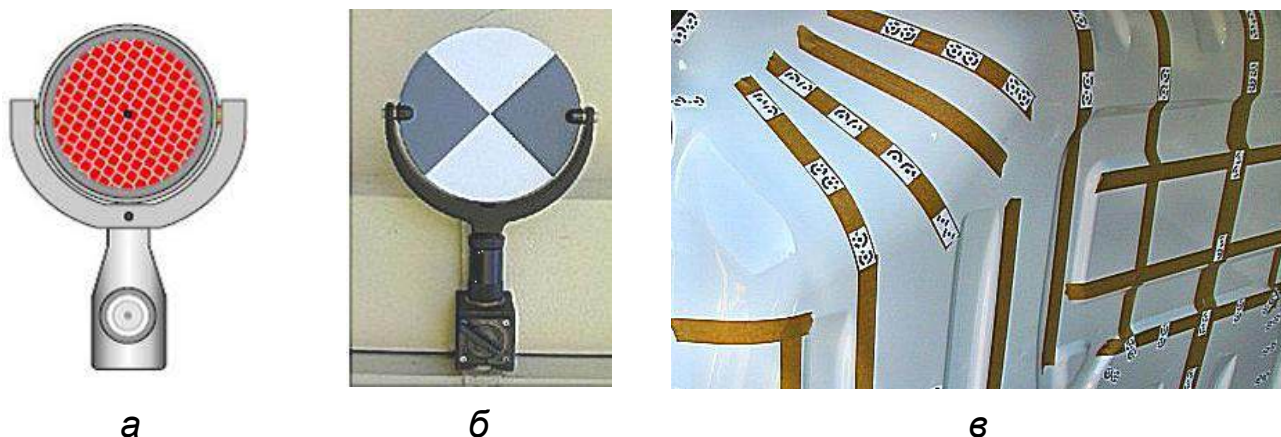


Рисунок 4.12 – Орієнтування моделі об'єкта за маркерами і мітками

Найчастіше для зйомки всього об'єкта цілком недостатньо знімати його в одному положенні сканера. Зазвичай роблять кілька зйомок із різних точок стояння, так, щоб максимально охопити весь об'єкт.

У результаті отримують кілька точкових моделей об'єкта, які потрібно об'єднати в одну. Це роблять за допомогою опорних точок у зоні перекриття зйомки. Крім положення точок об'єкта в просторі, сканером так само фіксується інтенсивність відбитого сигналу. Щоб отримати природні кольори в кожній точці сканування, використовують цифрову камеру, встановлену на сканер.

Деякі можливості лазерного тривимірного сканування з високим ступенем деталізації та точності для реінжинірингу виробів авіаційної та космічної техніки показано на рисунку 4.13.



а



б



в



г

Рисунок 4.13 – Приклади лазерного тривимірного сканування для реінжинірингу: а – винищувача; б – стапеля центроплана; в, г – модулів космічних апаратів, що спускаються

Провідними світовими лідерами в області розроблення метрологічних засобів та інженерних рішень для лазерного тривимірного сканування є компанії Leica Geosystems (Швейцарія) і FARO Technologies Inc. (США).

На рисунку 4.14 показано загальний вигляд лазерів для тривимірного сканування цих компаній.



а



б

Рисунок 4.14 – Загальний вигляд лазерів для тривимірного сканування:
а – Leica ScanStation P30; б – Faro Focus 3D X130

В таблиці 4.3 наведені основні технічні характеристики лазера для тривимірного сканування моделі Faro Focus 3D X130.

Таблиця 4.3 – Основні характеристики сканера Faro Focus 3D X130

Параметр	Величина
Діапазон сканування, м	0,6 ... 130
Швидкість сканування, точок/с	976000
Об'ємна точність, мм, мм/м	$\pm (0,5 + 0,02L)$
Поле сканування:	
- вертикальне, град	305
- горизонтальне, град	360
Крок сканування, град	0,01
Частота обертання дзеркала, 1/хв	5800
Потужність лазера, мВт	20
Довжина хвилі, нм	905
Діаметр променя на виході, мм	3,8
Габаритні розміри, мм	240 x 100 x 200
Маса, кг	5
<i>Примітка.</i> L – довжина, що вимірюється, м	

Основні сфери застосування тривимірного лазерного сканування:

- створення тривимірних моделей складних інженерних споруд і технологічного обладнання з високим ступенем деталізації та точності;
- зйомка фасадів історичних будівель, пам'ятників і унікальних об'єктів для їх реконструкції;
- дорожня зйомка;
- гірнича справа;
- моніторинг будівель і споруд;
- документування надзвичайних ситуацій.

Цей список далеко не повний, оскільки з кожним роком користувачі лазерних сканерів виконують все більше унікальних проектів, які розширюють сфери застосування технології тривимірного лазерного сканування.

4.3.4 Особливості розроблення комп'ютерної моделі прототипу виробу

Більшість лазерних сканерів фіксують точки поверхні об'єкта з надзвичайно високою щільністю порівняно з традиційними контактними методами вимірювання. У процесі сканування об'єкта, що вимірюється, процесор сканера отримує дуже багато сигналів від фотодіодної матриці, в деяких моделях до 75000 на секунду.

Складні поверхні, що мають велику кривизну, виходять більш точними при високій щільності хмари точок. Так само велика кількість точок позитивно позначається на точності визначення характеристик об'єктів у вигляді отворів, пазів, крайок циліндрів і т. ін.

Ці точки, відповідні координатам поверхні, що вимірюється, створюють так звану хмару *точок* (рисунк 4.15).

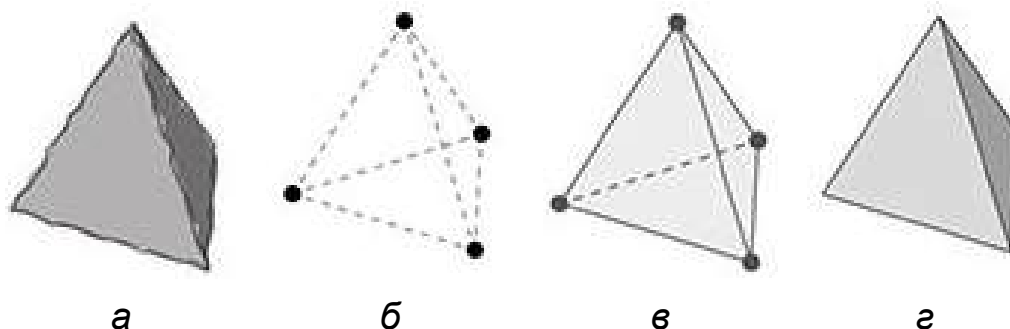


Рисунок 4.15 – Основні етапи створення CAD-моделі виробу:
а – виріб; б – хмара точок; в – полігональна модель; г – CAD-модель

Хмари точок забезпечують швидку візуалізацію об'єкта реального світу. При цьому вони успішно використовуються для вимірювання й контролю об'єктів, 3D-друку, наочної візуалізації важкодоступних місць або великих протяжних об'єктів, створення тривимірних і математичних моделей, розпізнавання образів, при автоматизованому аналізі, реконструкціях та експлуатації, а також є основою для реінжинірингу реально існуючих об'єктів.

Сканування дає хмару точок у тривимірному просторі за формою об'єкта, за якою можна побудувати полігональну сітку об'єкта сканування (рисунк 4.16).

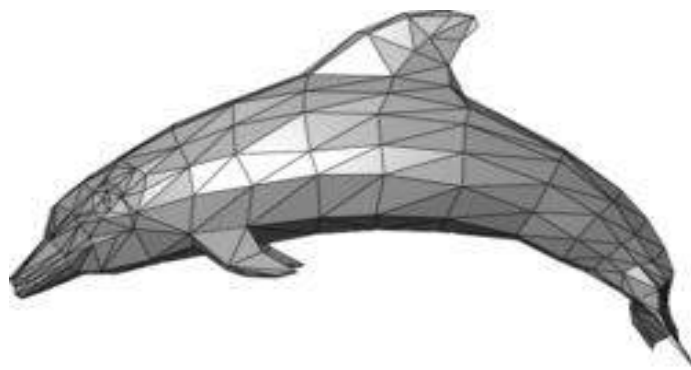


Рисунок 4.16 – Приклад полігональної сітки, що зображує дельфіна

Полігональна сітка – це сукупність вершин, ребер і граней, які визначають форму багатогранного об'єкта в тривимірній комп'ютерній графіці й об'ємному моделюванні.

Гранями зазвичай є трикутники, чотирикутники або інші прості опуклі багатокутники (полігони), оскільки це спрощує рендеринг.

Рендеринг (англ. rendering – візуалізація) – це процес отримання зображення за моделлю з допомогою комп'ютерної програми. Полігональна модель тим точніше і ближче до оригінального об'єкта, чим менше розмір полігонів і чим більше їх кількість.

Полігональне моделювання – це моделювання тільки поверхні об'єкта, тому полігональна модель не має інформації щодо об'єму реального виробу. До недоліків полігональних моделей відноситься неможливість отримання відомостей ще й про такі фізичні властивості об'єкта, як маса, центр ваги та ін. Твердотільне моделювання є найдосконалішим і найвірогіднішим методом створення копії реального об'єкта.

В основу моделювання покладено принцип формування складної моделі з елементарних об'ємів базисних тіл паралелепіпеда, куба, сфери, циліндра, конуса, клина, тора, а також як результат обертання або видавлювання областей з використанням логічних операцій об'єднання, віднімання, перетинання.

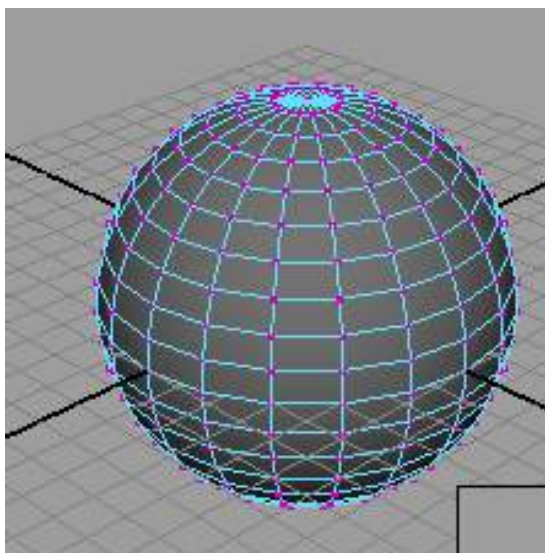
Одна з переваг твердотільних об'єктів полягає в можливості обчислення маси, центра ваги, площі поверхні. Твердотільна модель будується шляхом створення цілісності, яка не має розривів сукупності поверхонь, зшитих між собою і утворюючих правильний замкнутий геометричний об'єм. Отже, тверде тіло містить внутрішній об'єм, обмежений зовнішньою поверхнею.

Методи твердотільного моделювання, ґрунтовані на булевих операціях, особливо зручні при обчисленні поверхневих і вагових характеристик тіл, розрахунку напружень, імітації операцій механічної обробки. В останньому випадку операції різання металу можуть бути легко описані за допомогою булевої різниці.

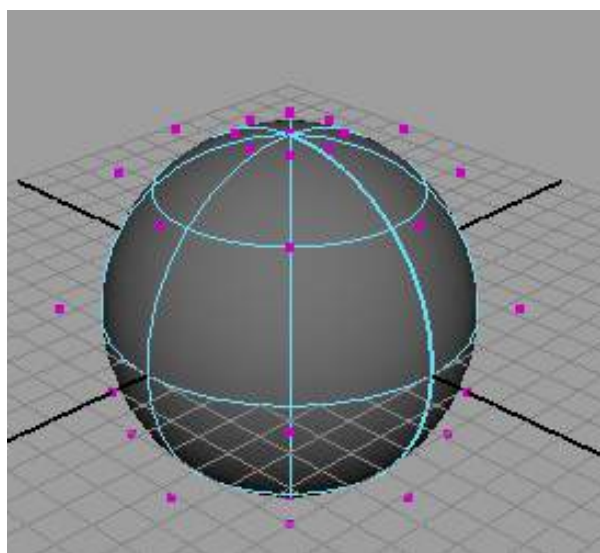
Найбільш вдалим описом складних форм об'єктів виявилися параметричні сплайни NURBS. Будь-яка NURBS-модель являє собою набір NURBS-поверхонь, утворених NURBS-кривими. При моделюванні відпадає необхідність запам'ятовувати кожну точку кривої: досить знати координати її початку й кінця та математичну формулу, яка описує криву.

Найпростіший вид NURBS-поверхонь – це NURBS-примітиви, подані такими об'єктами, як сфера, куб, циліндр, конус, площина та тор. Як і інші типи примітивів, NURBS-примітиви зазвичай використовуються як за основу для формування більш складних моделей.

Це дозволяє створювати складні криволінійні поверхні з невеликим числом керуючих вершин і легко позбавлятися від огранки об'єктів, надаючи їм плавну викривлену форму шляхом простого збільшення деталізації (рисунок 4.17).



а



б

Рисунок 4.17 – Приклад моделювання поверхні сфери:
а – полігональна сітка; б – NURBS-об'єкт

Характерною рисою параметричного моделювання виробів є математична правильність контурів при будь-якому масштабуванні та вирішенні. Відрізки стають ідеально рівними, заокруглення описуються частиною окружності, еліпса або гладкими математичними кривими.

Об'єкт із мільйонів трикутників перетворюється в набір циліндрів, площин, гладких поверхонь і т. д. (рисунок 4.18).



а



б

Рисунок 4.18 – Візуальне порівняння зовнішнього вигляду деталі (а)
та її математичної моделі (б)

Реінжиніринг має цілий ряд переваг порівняно з цифровим моделюванням:

- модель може бути завантажена в програми параметричного моделювання;
- параметрична модель матиме ключові точки побудови об'єкта з можливістю редагування;
- на відміну від штучно змодельованих моделі реінжинірингу містять більше геометричної інформації про об'єкт.

4.4 Програмне забезпечення лазерного реінжинірингу виробів

4.4.1 Система CoryCAD

Система CoryCAD компанії Delcam (Англія) використовує масив точок від лазерних сканерів KBM або хмари точок від ручних 3D-сканерів і дає можливість генерувати поверхневі моделі для подальшого експорту в CAD-форматі і можливості редагування в більшості систем комп'ютерного моделювання.

Система CoryCAD дає можливість вирішити такі завдання:

- створення 3D-моделей на основі масиву або хмари точок;
- збереження особливостей рельєфу поверхні моделі при редагуванні;
- 3D-візуалізація поверхні моделі.

CoryCAD використовує різні рівні структури побудови моделі з імпортованих даних.

Структура може складатися з таких об'єктів:

- точки (об'єкт нижчого рівня), які були отримані при використанні безконтактного методу лазерного сканування. Дослідження точкової моделі є важливим кроком при створенні якісної тріангуляційної моделі;

– лінії сканування утворюють структуру точкової моделі у вигляді декількох впорядкованих множин точок. Якщо модель отримана з використанням безконтактного методу сканування, то використовують точки для створення тріангуляційної моделі;

– тріангуляційна модель створюється на основі даних сканування. Тріангуляційна модель не повинна мати розривів поверхні або перекриттів між трикутниками. Система CoryCAD забезпечена модулем TriFIX, який дозволяє виправляти деякі дефекти тріангуляційної моделі (нашаровування декількох поверхонь, що перехрещуються, зайві трикутники та ін.). Тріангуляційні моделі експортують у форматах STL (для матеріалізації виробу за допомогою технології швидкого прототипування Rapid Prototyping) і DMT (використовують для створення програм керування фрезерною обробкою в програмному пакеті PowerMILL);

– поверхневу модель створюють на основі тріангуляційної моделі. Отримання поверхневої моделі з тріангуляційної дозволяє відтворити CAD-модель із відсканованої системи точок.

4.4.2 Система Magics RP

Система Magics RP компанії Materialise (Бельгія) – програма для роботи з файлами формату STL, яка призначена для редагування і відновлення STL-файлів. Її використовують для створення та редагування тріангуляційних моделей, а сама система орієнтована на підготовку моделей для їх матеріалізації з використанням технології швидкого прототипування Rapid Prototyping.

Автоматично створені тріангуляційні моделі, як правило, містять перевернуті трикутники, розриви поверхні або інші помилки геометрії, які потребують коригування. Magics RP, крім інструмента автоматичного усунення дефектів, також має інструменти для роботи з окремими дефектами.

До особливостей роботи в програмному пакеті можна віднести виявлення й автоматичне виправлення здебільшого дефектів тріангуляційних моделей, збирання частин моделі, аналіз геометрії моделі деталі (або складальної одиниці) з використанням інструментів перетинання, виконання замірів на площині або в просторі, верифікацію розмірів після матеріалізації, автоматизоване створення документації технологічного процесу.

Усі ці функції також можуть бути згруповані у дві категорії: редагування та коригування тріангуляційних моделей.

Можливості системи Magics RP щодо редагування тріангуляційних моделей:

- обрізання моделі;
- створення отворів;
- складання моделей з декількох деталей;
- створення найпростіших геометричних тіл, таких, як сфера, циліндр, паралелепіпед, конус, піраміда, призма тощо.

4.4.3 Система Geomagic Studio

Система Geomagic Studio компанії Geomagic (США) призначена для проведення реінжинірингу виробів і дозволяє створювати поверхневу модель об'єкта за даними сканування.

Процес створення моделі виробу в програмному пакеті Geomagic Studio складається з трьох етапів:

1. Оброблення набору систем точок (Capture), реєстрація та видалення зайвих із безлічі точок; зниження шумів; об'єднання відсканованих зображень і виконання тріангуляції.

2. Оброблення полігонів (Wrap), яке містить спрощення даних, відновлення тріангуляційних поверхонь (заповнення отворів, відновлення кромок), їх редагування (логічні операції, усереднення елементів, що повторюються) і підготовка до матеріалізації моделі виробу за технологією швидкого прототипування Rapid Prototyping.

3. Створення NURBS-поверхонь (Shape), що виконується автоматично або інтерактивно (визначення кривих, конструювання вставок, створення параметричної сітки, припасування поверхонь), проведення аналізу відхилень при порівнянні із системою виміряних точок і експорт даних.

Програмний пакет Geomagic Studio забезпечує високу швидкість роботи з великими обсягами даних (до 100 мільйонів точок), підтримує взаємодію з різними видами сканерів і виконує імпорт і експорт даних у різних форматах. Програмний пакет Geomagic Studio складається з п'яти основних модулів.

Модуль Geomagic Capture призначений для збирання систем точок за допомогою сканера, суміщення даних, отриманих при різних положеннях деталі або сканера, а також для інтелектуальної фільтрації та редагування набору систем точок (видалення «викидів», «шумів» і т. д.).

Модуль Geomagic Wrap призначений для тріангуляції точкової моделі та редагування отриманої тріангуляційної моделі (заповнення розривів, зменшення кількості трикутників, згладжування поверхонь, загострення граней і т. д.).

Модуль Geomagic Shape автоматично виявляє вигини поверхонь об'єкта й перетворює тріангуляційні моделі в NURBS-поверхні. При цьому забезпечується автоматичне збереження топології форми. Реалізовані можливості організації та злиття окремих фрагментів поверхонь.

Модуль Geomagic Fashion призначений для розпізнавання початкового дизайну об'єкта й підготовки до імпорту в CAD/CAM-системи. В результаті оброблення реконструюються стандартні геометричні елементи, які складають поверхню об'єкта (площини, циліндри, сфери і т. д.).

Модуль Geomagic Quality – метрологічне програмне забезпечення, яке робить процес перевірки якості виготовлення виробу більш наочним, дозволяє накладати хмару точок на вихідну CAD-модель, задавати допуск і фарбувати кожну точку в різні кольори залежно від відхилення від CAD-моделі. Таким чином, отримують колірну карту відхилень, відстежують частини виробу, розміри яких виконані за межами допуску. Geomagic Quality крім оперативного 3D-контролю дозволяє визначати лінійно-кутові розміри елементів деталі, а також контролювати відхилення форми та взаємного розташування поверхонь. Процес створення звітів повністю автоматизований.

Всі наведені вище системи розроблені для вирішення завдань реінжинірингу, але кожен із них має свою раціональну область застосування.

Система CoryCAD спеціалізується на програмному забезпеченні реінжинірингу із застосуванням стаціонарних і мобільних КВМ. При цьому вона має важливу перевагу, що дозволяє перейти відразу від точкової до поверхневої моделі. Такий підхід забезпечує подальше редагування тривимірної моделі в CAD-системах, пропускаючи етап перетворення тріангуляційної моделі в поверхневу. Тим самим зменшується похибка створення моделі і час на її оброблення.

Система Magics RP надає можливість роботи на більш докладному рівні з тріангуляційними моделями. Система Magics RP орієнтована на вирішення завдань із підготовки моделі до матеріалізації виробів на базі технології швидкого прототипування Rapid Prototyping.

Найбільш повно можливості системи Geomagic Studio реалізовані для роботи з тріангуляційними моделями виробів. Деякі операції виконують з підтримкою декількох ядер процесора комп'ютера, що значно прискорює процес оброблення.

4.4.4 Система тривимірного лазерного сканування Leica Cyclone

Одним із найкращих програмних комплексів вважають продукт Leica Cyclone, що містить у собі всі інструменти, необхідні для виконання повного циклу робіт в інженерії, геодезії та будівництві з використанням обладнання Leica Geosystems.

Програма Leica Cyclone містить чотири модулі, необхідні для розв'язання окремих задач загального процесу оброблення даних тривимірного лазерного сканування:

1. Cyclone-SCAN – модуль, призначений для управління роботою сканера. Користувач може вибирати швидкість і щільність сканування, задавати область сканування, фільтрацію даних, прив'язування станції за наявності геодезичної основи, попередній аналіз отриманих даних тощо.

2. Cyclone-REGISTER – модуль, що застосовують для врівноваження хмар точок, отриманих із різних точок стояння, за допомогою спеціальних марок або без них, а також для прив'язування даних сканування до будь-якої відомої системи координат.

3. Cyclone-Survey – спрощена система оброблення хмар точок, до якої входять всі інструменти, необхідні для створення триангуляційних моделей, для розрахунку об'ємів тіл і площ поверхонь, створення ортогональних зображень.

4. Cyclone-MODEL – модуль, що призначений для моделювання двовимірних і тривимірних геометричних елементів і створення креслень. Важливою особливістю цього модуля є можливість за допомогою напівавтоматичних інструментів моделювання створювати моделі труб і складних металоконструкцій.

Однією з переваг програмного продукту Leica Cyclone є об'ємна повнота тривимірних хмар точок порівняно з іншими джерелами геометричної інформації про об'єкт. Всі дані – хмари точок, зображення, топографічне прив'язування, результати вимірювання та врівноваження, моделі об'єктів та інші дані зберігаються в одному файлі.

Контрольні запитання

1. Надайте поняття «реінжиніринг» і назвіть основні етапи процесу реінжинірингу.

2. Яке обладнання є необхідним для виконання реінжинірингу? Надайте їх класифікацію.

3. Охарактеризуйте 3D-сканери за методом збирання інформації.

4. Назвіть і поясніть принцип, на якому базується лазерне сканування промислових виробів.

5. У чому спостерігаються особливості розроблення комп'ютерної моделі прототипу виробу?

6. Які Ви знаєте системи для програмного забезпечення лазерного реінжинірингу виробів?

5 КООРДИНАТНІ ВИМІРЮВАННЯ ЛАЗЕРНИМ ТРЕКЕРОМ

5.1 Принцип вимірювання лазерним трекером

Принцип вимірювання за допомогою лазерного трекера (англ. to track – слідкувати) оснований на реєстрації азимутального θ і вертикального Φ кутів і відстані d до точки на об'єкті контролю (рисунок 5.1, а).

Трекер посиляє імпульсний лазерний промінь на відбивач CCR (cube corner reflector) – скляну призму повного внутрішнього відображення, яка знаходиться всередині металевої сфери (рисунок 5.1, б).

Одним із характерних ознак трекера є автоматичне керування кутовими координатами променя. Трекер спрямовує промінь в потрібному напрямку за допомогою кутових поворотів і утримує промінь у центрі призми відбивача (рисунок 5.1, в), спрямовуючи частину відбитого променя на позиційно-чутливий детектор.



Рисунок 5.1 – Принцип координатних вимірювань лазерним трекером

Вимірювальний блок лазерного трекера містить оптичну систему, сервоприводи, кутомірні пристрої, блоки далекомірів (інтерферометр і абсолютний далекомір) і має дві перпендикулярні осі обертання.

Обертання навколо осей здійснюється за допомогою сервоприводів, кожна вісь забезпечена пристроєм для визначення кута повороту (енкодером). Сервоприводи дозволяють наводити лазерний промінь на вимірюваний об'єкт і відслідковувати стан відбивача.

Основним завданням трекера є спостереження лазерного променя за положенням відбивача. Це виконується за допомогою електронної системи зворотного зв'язку. Коли промінь потрапляє в центр призми, він повертається без зміщення. Якщо лазерний промінь потрапляє не в центр призми, він відбивається назад, паралельно променю, що падає, але з деяким зміщенням.

Позиційно-чутливий детектор (PSD) вимірює зміщення, що дозволяє відрегулювати кутове положення вихідного і відбитого променів щодо центру призми відбивача.

Для реєстрації відстані в лазерному трекері застосовують принцип частотного зсуву між випроміненим і прийнятим частотно-модульованими сигналами лазерного випромінювання.

Частина відбитого лазерного променя після повернення в оптичну систему трекара надходить у далекомір (рисунок 5.2), який обчислює відстань від трекара до рефлектора абсолютним методом ADM (absolute distance meter).

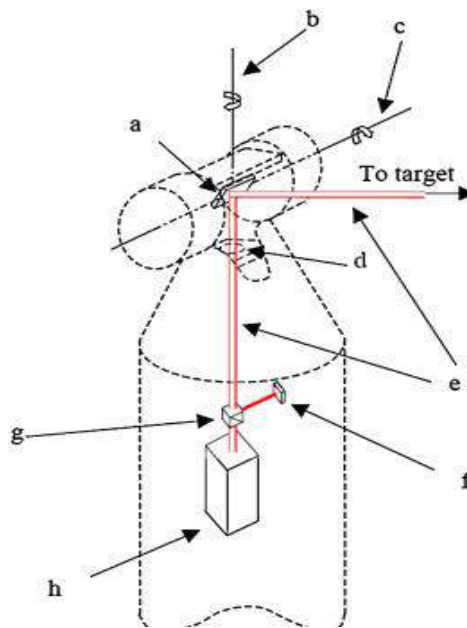


Рисунок 5.2 – Принципова схема далекоміра лазерного трекара:
 1 – поворотне дзеркало; 2, 3 – осі обертання дзеркала; 4 – об'єктив;
 5 – лазерний промінь; 6 – позиційно-чутливий датчик;
 7 – роздільна призма; 8 – лазер

Трекер автоматично стежить за відбивачем, а оператор з необхідності здійснює фіксацію поточних координат вимірюваного об'єкта за допомогою дистанційного пульта управління.

Спочатку трекер установлюють поблизу об'єкта для вимірювання. Відбивач фіксують на корпусі трекара в спеціальному гнізді (англ. home position) для захоплення променя лазера (рисунок 5.3, а), потім оператор переміщує відбивач на поверхню об'єкта (рисунок 5.3, б).



а



б

Рисунок 5.3 – Навчальний етап вимірювань лазерним трекером

Відбивач стикається з поверхнею об'єкта. Поправка на діаметр сфери з відбивачем автоматично враховується при всіх вимірюваннях.

5.1.1 Технічні характеристики лазерних трекерів

До складу лазерного трекера входять такі елементи:

- вимірювальний блок (поворотна головка, лазерний випромінювач, оптичні датчики-енкодери кутів повороту, електропривід);
- контролер, який обробляє інформацію та зв'язує вимірювальний блок з комп'ютером;
- комп'ютер із програмним забезпеченням, який керує вимірювальним блоком і аналізує результати через вимірювання;
- магнітна плита або штатив.

На світовому ринку розробників лазерних трекерів лідирують три основні компанії: швейцарська Leica Geosystems AG та американські FARO й API (Automated Precision Inc.).

У таблиці 5.1 наведені основні технічні характеристики лазерних трекерів даних компаній, які широко застосовуються в авіаційній промисловості та машинобудуванні.

Таблиця 5.1 – Технічні характеристики лазерних трекерів

Параметр	Модель лазерного трекера		
	Leica AT403	FARO ION	API Tracker 3
Точність вимірювання відстаней, мкм/м	$\pm (15 + 6L)$	$\pm (26 + 5L)$	$\pm (15 + 6L)$
Точність вимірювання кутів, кут. с	$\pm 0,10$	$\pm 0,18$	$\pm 0,12$
Дальність вимірювання, м	80	55	60
Діапазон горизонтальних кутів, град	360		
Діапазон вертикальних кутів, град	+ 45 / - 45	+ 72 / - 52	+ 72 / - 60
Частота динамічних вимірювань, кГц	10		
Габаритні розміри трекера, мм	290 x 221 x 188	311 x 311 x 556	185 x 190 x 360
Маса вимірювальної головки, кг	7,3	19,5	8,5
Маса контролера, кг	0,8	5,2	3,2
<i>Примітка.</i> L – довжина, що вимірюється, м			

Конструктивно лазерні трекери розрізняються місцем розташування інтерферометра й далекоміра, кількістю дзеркал, що заломлюють, організацією інтерфейсу, підведенням кабелів. Геометричні розміри відбивачів і штативів однакові й поставляються іншими компаніями.

У лазерних трекерах компанії API інтерферометр і абсолютний далекомір розташовані в поворотній вимірювальній головці.

Компанія Leica для виведення випромінювання в лазерних трекерах використовує систему дзеркал, закріплених як у поворотній, так і в нерухомій частині приладу. Інтерферометр і абсолютний далекомір розташовані в нерухомій частини приладу.

У лазерних трекерів компанії FARO інтерферометр і далекомір розташовані в нерухомому корпусі, з'єднаному з поворотною головкою волоконно-оптичним кабелем для транспортування лазерного променя.

На рисунку 5.4 показано зовнішній вигляд лазерних трекерів згідно з даними таблиці 5.1.



а



б



в

Рисунок 5.4 – Лазерні треке-ри моделей:
а – Leica AT403; б – FARO ION; в – API Tracker 3

Невеликі габаритні розміри й маса останніх моделей лазерних треке-рів дозволяють встановлювати їх у будь-якому зручному положенні (вер-тикально, в перевернутому вигляді й під будь-яким кутом). Є можливість кріплення лазерного трекера безпосередньо на об'єкті без використання стандартного штатива.

Основні області застосування лазерних трекерів у авіаційному та ра-кетно-космічному виробництві, а також у машинобудуванні:

- контроль складних криволінійних поверхонь великогабаритних ви-робів. Завдяки великій робочій зоні лазерний трекер дозволяє контролю-вати великогабаритні агрегати літаків, корпуси суден і вагонів, кузови ав-томобілів, станини верстатів і пресів, великі металоконструкції методом порівняння з CAD-моделлю;

- складання великогабаритних виробів. Завдяки здатності лазерів відстежувати стан відбивача в режимі реального часу. Це дозволяє ефек-тивно використовувати їх для монтажу стапелів, а також як елемент керу-вання в автоматичних стендах складання й стикування виробів авіаційної та ракетно-космічної техніки.

Використання лазерних трекерів дозволяє істотно скоротити час на проведення складальних і монтажних операцій і відмовитися від застосу-вання спеціальної технологічної та контрольної оснастки.

5.1.2 Функціональні особливості застосування лазерних трекерів

Сферичні відбивачі CCR виготовлені з нержавіючої сталі та мають стандартний діаметр 1,5; 7/8 і 0,5 дюйма (рисунок 5.5, а). Вони зберігають-ся на гумових ложементях, щоб уникнути дряпання (рисунок 5.5, б). Для контролю базових точок сферичні відбивачі можуть бути встановлені на спеціальні магнітні підставки (рисунок 5.5, в).

Для контролю прихованих ділянок сферичні відбивачі встановлюють на перехідники різної висоти з циліндричними хвостовиками (рисуюнок 5.5, а) або конічними центрошукачами (рисуюнок 5.5, б).



Рисуюнок 5.5 – Сферичні відбивачі для лазерних трекерів

Відхилення форми відбивача від сферичності не перевищує 5 мкм, концентричність центрів призми і сфери – 10 мкм. Останнім часом широко розповсюдження набули високоточні порожнисті відбивачі, в яких призму замінили на удароміцні металеві дзеркала.

Відхилення осі симетрії сферичного відбивача при його переміщенні не має перевищувати $\pm 30^\circ$ від напрямку лазерного променя.

У процесі роботи оператор може контролювати наведення головки лазерного трекера на відбивач за допомогою відеокамери огляду, після чого процес вимірювань проводиться автоматично.

Система лазерного слідувального трекера оснащена системою Power Lock, що дозволяє за допомогою інтегрованої камери автоматично виконувати наведення сенсора на відбивач.

Лазерний трекер може працювати в двох режимах: інтерферометра (IFM) та абсолютним методом (XtremeADM).

При роботі в режимі інтерферометра в разі перекриття лазерного променя оператор має знову встановити відбивач у вихідне місце на корпусі лазерного трекера. Після цього потрібно захопити промінь сферичним відбивачем або щупом і продовжити вимірювання.

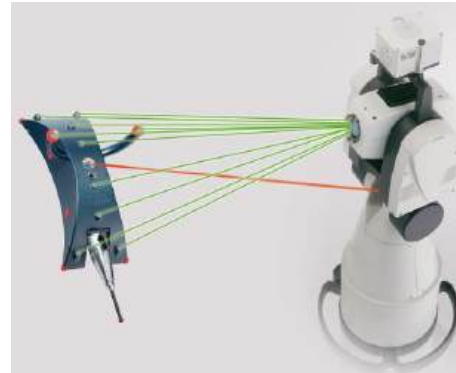
Бездротові електронні щупи компанії Leica з вбудованим сферичним відбивачем моделей B-Probe і T-Probe з регульованою до 200 мм довжи-

ною наконечника призначені для доступу до прихованих від лазерного променя точок на об'єкті, що контролюється (рисунок 5.6, а).

Просторове положення щупа моделі Leica-T-Probe з шістьма степенями вільності в руці оператора визначається лазерним трекером автоматично методом тріангуляції випромінювання (Power Lock) від восьми інфрачервоних світлодіодів (рисунок 5.6, б).



а



б

Рисунок 5.6 – Щупи моделей Leica B-Probe та T-Probe (а) і схема визначення лазерним трекером просторового положення щупа (б)

Щуп моделі Leica T-Probe має розширені кути захвату лазерного променя: щодо тангажа $\pm 45^\circ$, курсу $\pm 45^\circ$, крену – без обмеження.

На рисунку 5.7 показані приклади контролю лазерним трекером закритих ділянок планера літака за допомогою бездротових електронних щупів із призмовим відбивачем моделей Leica-B-Probe і T-Probe.



а



б

Рисунок 5.7 – Приклади використання щупів Leica для контролю лазерним трекером: а – шпангоута; б – лонжерона крила

При роботі в режимі контролю абсолютним методом XtremeADM у разі втрати променя встановлювати відбивач у стартову позицію на корпусі трекера необов'язково. Досить знову захопити промінь відбивачем у зоні контролю, наприклад, за допомогою долоні, і лазерний трекер знову готовий до роботи (рисунок 5.8, а). Оператор може виділити на комп'ютерній CAD-моделі область сканування та провести вимір точок на поверхні в реальному масштабі часу (рисунок 5.8, б).



а



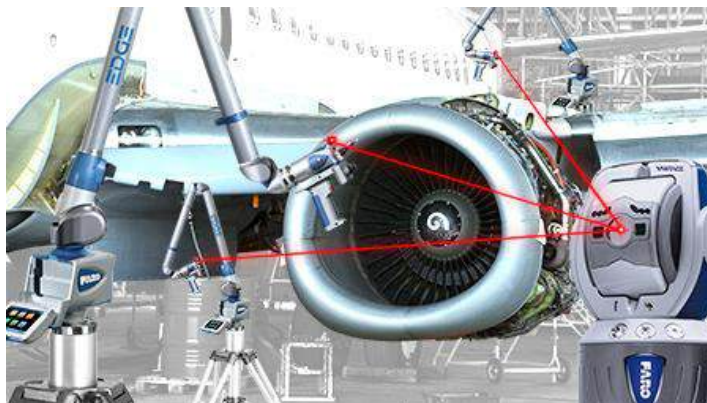
б

Рисунок 5.8 – Відновлення захоплення лазерного променя відбивачем при роботі в режимі XtremeADM

Програмне забезпечення TrackArm призначено для спільної роботи мобільної КВМ і лазерного трекера. Закінчивши роботу з дрібними елементами конструкції на мобільній КВМ (рисунок 5.9, а), можна продовжувати вимірювання лазерним трекером (рисунок 5.9, б).



а



б

Рисунок 5.9 – Спільна робота лазерного трекера і мобільної КВМ

Для вимірювання геометричного елемента оператор має виміряти на його поверхні певну кількість точок: наприклад, для лінії – мінімум дві, для площини й окружності – три. Зібрані дані автоматично трансформуються програмним забезпеченням трекера в положення заданої системи координат. Пульт дистанційного керування дозволяє оператору проводити вимірювання без переміщення від комп'ютера до об'єкта й назад.

На початку роботи за допомогою програмного забезпечення та самого лазерного трекера призначають систему координат (точка відліку й напрямки осей) шляхом вимірювання та запам'ятовування координат базових елементів на об'єкті контролю.

Для переустановлення лазерного трекера та продовження вимірювань у раніше недоступній зоні здійснюють прив'язування до даних базових елементів. Трекер вимірює координати відбивача на кожному базовому елементі до та після зміни свого положення (рисунок 5.10).

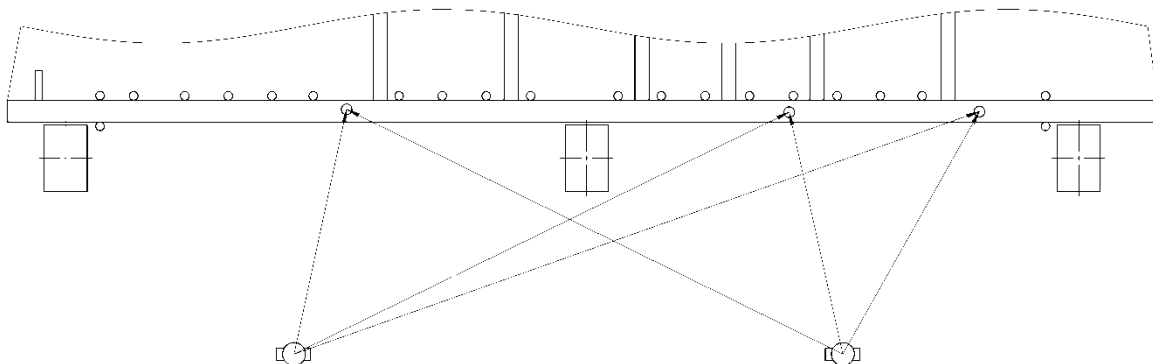


Рисунок 5.10 – Прив'язування лазерного трекера за трьома базовими точками

Лазерні трекери можуть доукомплектовуватися різними пристроями, які розширюють їх метрологічні можливості в області високоточних координатних вимірювань. За допомогою лазерного сканера моделі Leica TScan (рисунок 5.11, а) можна зробити вручну (рисунок 5.11, б) або на базі робота-контролера (рисунок 5.11, в) реінжиніринг поверхонь вертольота або літака. Для контролю лазерним трекером переміщень виконавчих механізмів роботів або великогабаритного технологічного обладнання використовують вимірювальний сканер моделі Leica T-Mac (рисунок 5.11, г).



а



б



в



г

Рисунок 5.11 – Лазерний і вимірювальний сканери компанії Leica

За допомогою вбудованого сферичного відбивача CCR вимірювальний сканер моделі Leica T-Mac приймає випромінювання від лазерного сканера в режимі атестації робота-контролера (рисунок 5.12, а). При роботизованому клепанні панелей фюзеляжу також застосовують вимірювальний сканер моделі Leica T-Mac і лазерний трекер (рисунок 5.12, б).



а



б

Рисунок 5.12 – Контроль робіт за допомогою вимірювального сканера моделі Leica T-Mac і лазерного трекера

На підставі розрахованих відхилень лазерний трекер передає промисловому роботу через вимірювальний сканер моделі Leica T-Mac відповідні команди для коригування його положення.

5.1.3 Функціональні можливості лазерного радара

Лазерні радари компанії Nikon Metrology (США) є унікальними метрологічними приладами, які забезпечують можливість автоматизованого й безконтактного вимірювання геометричних параметрів великогабаритних об'єктів авіаційної техніки.

Принцип дії лазерного радара даної компанії полягає в такому.

У радарі використовують два типи лазерів: інфрачервоний (довжина хвилі випромінювання 1550 нм) безпосередньо для координатних вимірювань (Measurement) і з променем червоної області спектра (700 нм) для наведення вручну або автоматично на потрібну точку об'єкта контролю (Pointing). Діаметр плями від червоного променя становить 0,6 мм на відстані до поверхні 10 м. Вихід лазерних променів з об'єктива поворотної головки суміщений для зручності роботи в ручному режимі контролю.

В лазерний радар вбудований телевізійний приймач інфрачервоного випромінювання, поворот якого навколо горизонтальної та вертикальної осей здійснюється за допомогою сервоприводів (енкодерів).

Відбита від поверхні електромагнітна хвиля лазерного випромінювання потрапляє в частотно-модульований лазерний далекомір. Запатентований компанією Nikon Metrology метод вимірювання відстані лазерним радаром порівнюємо за точністю з лазерним інтерферометром.

У таблиці 5.2 наведені основні технічні характеристики лазерних радарів компанії Nikon Metrology двох моделей для безконтактного вимірювання й контролю положення, розмірів, профілю поверхні великогабаритних об'єктів авіаційної техніки.

Таблиця 5.2 – Технічні характеристики лазерних радарів

Параметр	Модель лазерного радара	
	MV 330	MV 350
Точність вимірювання відстаней, мкм/м	± (10 + 2,5L)	
Точність вимірювання кутів, кут. с	± 0,10	
Дальність вимірювання, м	30	50
Діапазон горизонтальних кутів, град	360	
Діапазон вертикальних кутів, град	± 45	
Частота динамічних вимірювань, Гц	2000	
Габаритні розміри радара, мм	400 x 380 x 460	
Маса вимірювальної головки, кг	40	
Маса контролера, кг	45	
Примітка. L – довжина, що вимірюється, м		

Можливе розміщення лазерного радара на автоматизованих роботах-маніпуляторах при довільному розташуванні в просторі.

Лазерний радар на відміну від лазерного трекера не потребує застосування сферичних відбивачів або щупів, які можуть вносити додаткові похибки при вимірюваннях.

Телевізійне сканування передбачає періодичне перефокусування лазерного радара в автоматичному режимі при зміні дальності до об'єкта вимірювання в заданому діапазоні.

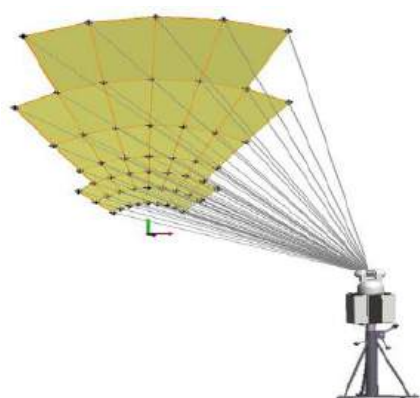
Можливі такі базові варіанти задання дискретності перетинів, за якими проводять сканування й порівняння з CAD-моделлю:

- PseudoVision: 0,1 ... 0,2 мм;
- Metrology: 0,05 мм;
- Enhanced metrology: 0,025 мм.

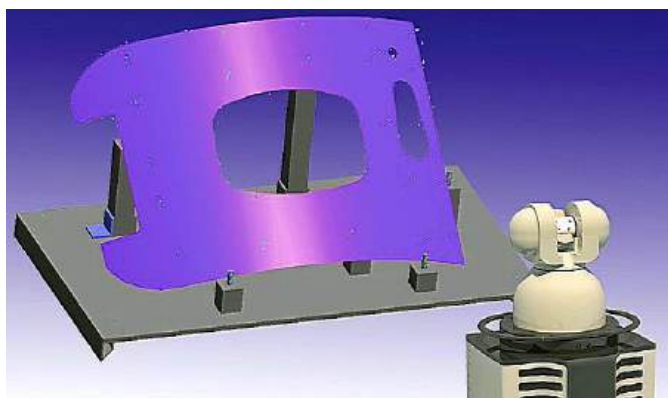
Передбачені також спеціальні режими сканування:

- визначення координат точки перетину поверхні із заданим просторовим вектором;
- автоматичне визначення вектора нормалі до попередньо заданої точки на поверхні;
- автоматичне визначення центрів отворів;
- контроль центрів базових (реперних) металевих сфер і спеціальних марок.

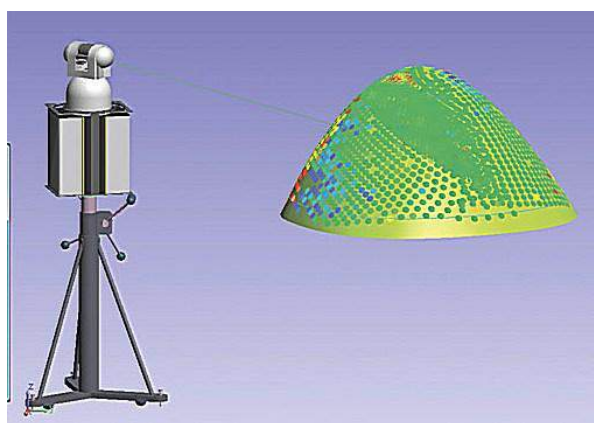
Сервоприводи забезпечують високоточне наведення відеокамери лазерного радара на об'єкт і автоматичне відстеження її кутового положення (рисунок 5.13, а). Оператор вибирає базові точки, необхідні для прив'язування лазерного радара (рисунок 5.13, б), і задає на екрані комп'ютера область сканування (рисунок 5.13, в), або окремі точки 3D-моделі об'єкта контролю (рисунок 5.13, г).



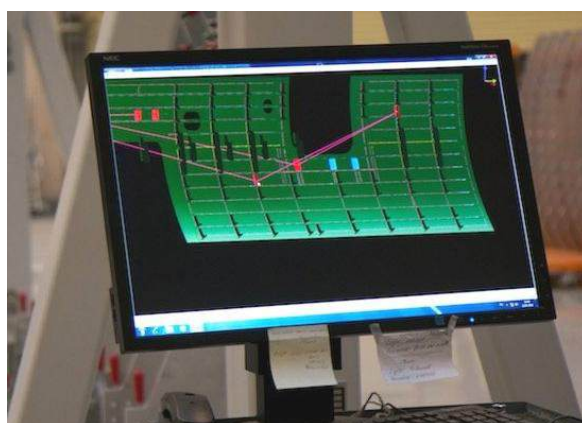
а



б



в



г

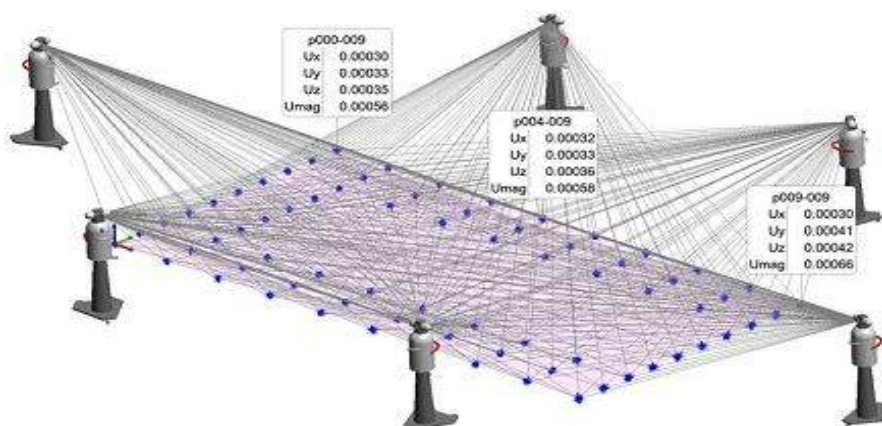
Рисунок 5.13 – Функціональні можливості лазерного радару

Вимірювання центрів металевих сфер використовують для автоматичного контролю стабільності положення лазерного радару.

Перед початком роботи на підлозі, стінах, стабільних опорних конструкціях цеху розміщують цільові знаки – високоточні сфери на магнітних підставках (рисунок 5.14, а). Місце установа лазерного радару вибирають виходячи з видимості робочої зони об'єкта контролю – експлуатаційних меж лазерного радару (рисунок 5.14, б).



а



б

Рисунок 5.14 – Прив'язування лазерного радару до цільових знаків

Цільові знаки призначені для закріплення системи координат лазерного радара в просторі, перевірки його стабільності та можливості переміщення в просторі в межах отриманої опорної координатної сітки.

Лазерний радар дозволяє виконувати з використанням безконтактної технології вимірювання таких специфічних об'єктів контролю, як композитні матеріали, дзеркала, сітчасті структури, нагріті об'єкти.

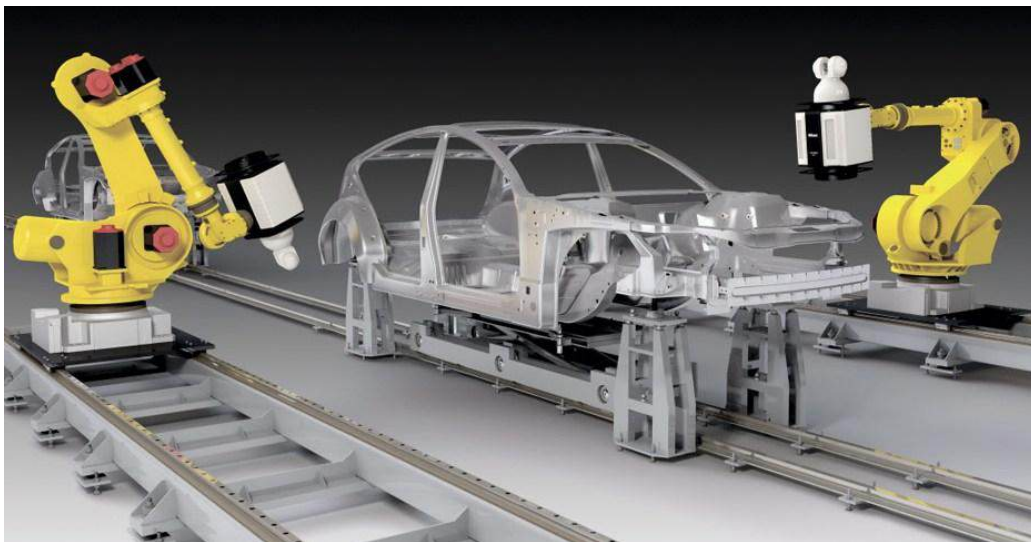
Приклади застосування лазерного радара для контролю складання з одночасною перевіркою геометричних параметрів складних поверхонь показані на рисунку 5.15.



а



б



в

Рисунок 5.15 – Приклади використання лазерного радара для контролю:
а – відсіку фюзеляжу; б – навішування двигуна;
в – каркаса кузова автомобіля після зварювання

Особливістю лазерних трекерів і радарів є їх мобільність. Трекери і радари упаковують у спеціальні штатні кейси та транспортують у будь-яке місце для проведення вимірювань.

Вбудована електронна система Integrated Weather Station контролює умови навколишнього середовища, у тому числі температуру, тиск і вологість, з метою компенсації змін і забезпечення точності через вимірювання незалежно від зовнішніх чинників.

В Україні, як і у всіх країнах-виробниках авіаційної, ракетно-космічної техніки й важкого машинобудування, лазерні тремери й радары внесені до державного реєстру засобів вимірювання.

5.1.4 Програмне забезпечення для лазерних тремерів і радарів

Програмне забезпечення (ПЗ) SpatialAnalyzer, розроблене американською компанією New River Kinematics, призначене для оброблення даних, отриманих від лазерних тремерів, радарів і сканерів.

До складу ПО SpatialAnalyzer входять такі модулі:

- SpatialAnalyzer Basic – перегляд, аналіз даних вимірювань і порівняння з CAD-моделлю; побудова геометричних елементів; робота із системами координат; вимірювання відстаней між точками, кутів; імпорт та експорт через стандартні формати;

- Relationships and Relationship Fitting – установлення взаємозв'язку об'єктів, розширені можливості прив'язування до CAD-моделей складної структури;

- Measurement Planning – створення вимірювальних програм, автоматизація вимірювань і оброблення результатів;

- Reverse Engineering – модуль для створення твердотільних 3D-об'єктів із вимірної хмари точок;

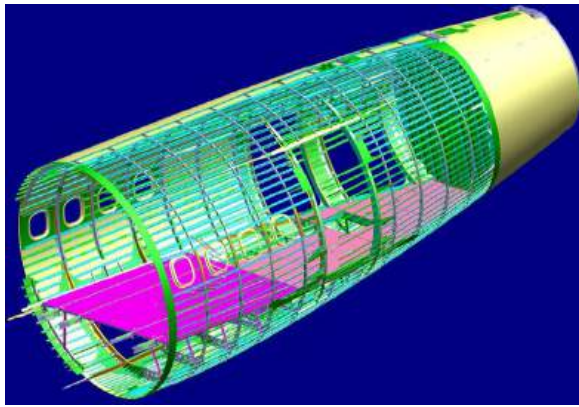
- Transformation Tracking – модуль, який дозволяє стежити за переміщенням об'єкта. У режимі реального часу за допомогою лазерного тремера відстежується положення одного відбивача на об'єкті й виходячи з даних про його зміщення в просторі розробляються положення інших відбивачів, встановлених на переміщуваному об'єкті;

- Robot Calibration – модуль для підключення й управління виробничим роботом і розрахунок поправок на його переміщення.

5.2 Монтаж і контроль складальної оснастки лазерним тремером

Похибки виробів, що збираються в складальних пристосуваннях, залежать від ступеня точності виготовлення окремих елементів і точності їх установлення, тобто від технології виготовлення й монтажу оснастки. Головними труднощами при монтажі великогабаритної складальної оснастки є виключення накопичених похибок, пов'язаних із виготовленням вузлів і прогином елементів рами конструкції під власною вагою.

У сучасних умовах на підприємствах авіаційної промисловості все ширше застосовують технологію безеталонного монтажу складальної оснастки. Ця технологія передбачає позиціонування елементів конструкції складальної оснастки за координатами на основі даних електронної 3D-моделі об'єкта складання (рисунок 5.16).



а



б

Рисунок 5.16 – Електронні 3D-моделі відсіку ФЗ (а) і стапеля складання (б) літака Ан-148 (ДП «АНТОНОВ»)

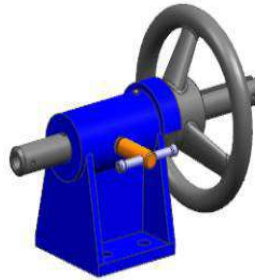
Основні типи елементів складальної оснастки, що монтуються, показані на рисунку 5.17.



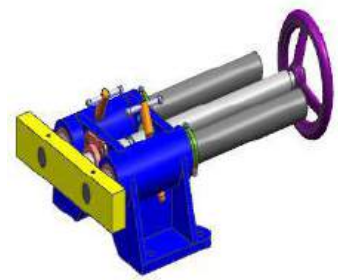
а



б



в



г

Рисунок 5.17 – Типи елементів складальної оснастки, що монтуються: а – вилки; б – вушка; в – висувні фіксатори; г – упори

Для встановлювальних кронштейнів (вилки, вушка) базою є отвір навішування елемента, що базує, складальної оснастки рубильника або ложементу.

На висувному фіксаторі базою є його вісь, що визначає положення відповідного БО або КФО на деталі зібраного виробу.

На висувному упорі базою є поверхня, яка служить для базування деталі виробу, що складається.

На великогабаритних елементах типу рубильників або ложементів базою служить контур, розташований у певній площині. Він використовується для базування поверхні деталі виробу, що складається.

Лазерні засоби вимірювань та інформаційні технології проектування складальної оснастки дозволяють виконувати монтаж великогабаритних засобів технологічної оснастки.

Конструктивно-компонувальна схема складальної оснастки має враховувати можливість проведення вимірювань при монтажі за допомогою мобільної КВМ або лазерного трекера.

5.2.1 Монтаж складальної оснастки на базі мобільної КВМ

Для реалізації технології безеталонного монтажу складальної оснастки на базі мобільної КВМ необхідна наявність трьох компонентів:

- електронної моделі складальної оснастки – першоджерела даних для виконання позиціонування елементів складальної оснастки за координатами їх базових точок;

- засоби вимірювання координат – для визначення фактичних координат базових точок конструкції, що монтується, та порівняння їх з номінальними значеннями, заданими в електронній координатній моделі;

- засоби позиціонування – для виконання переміщення й орієнтації в просторі елемента конструкції, що монтується, за заданими координатами.

Засоби позиціонування дозволяють переміщувати елемент, що базується, і пов'язаний з ним перехідний калібр у просторі стапеля за шістьма координатами.

Позиціонер містить три модулі одноточкового позиціонування, які керують положенням носія опорної точки (рисунок 5.18).

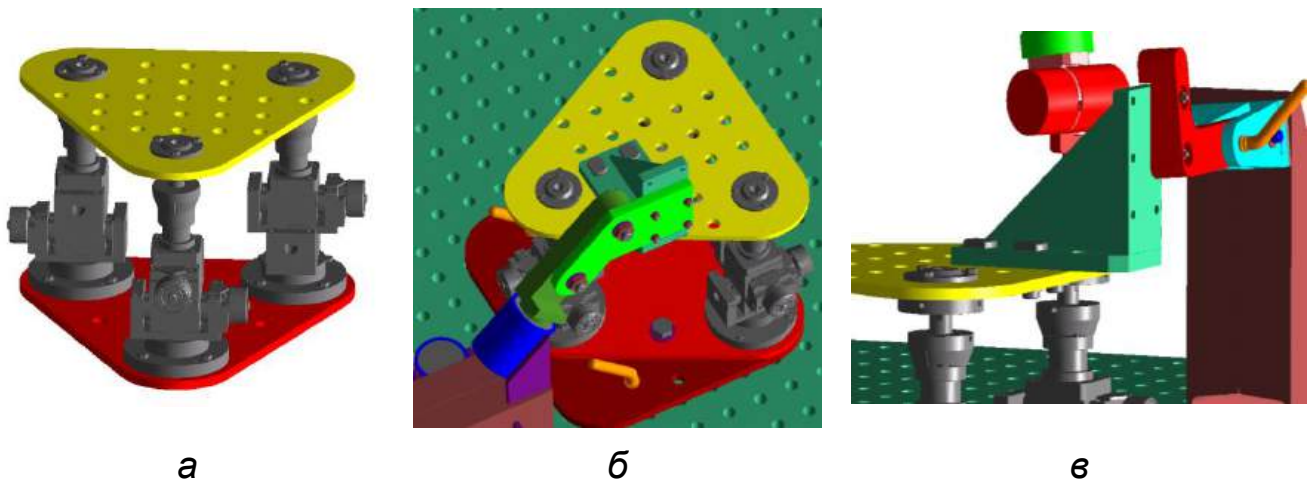


Рисунок 5.18 – Комп'ютерна симуляція загального вигляду позиціонера (а) та монтажу подовженої вилки (б) й відкидного фіксатора (в)

Модуль одноточкового позиціонування містить два основних елементи:

- носій опорної базової точки;
- пристрій лінійних переміщень носія базової точки по трьох взаємно перпендикулярних осях.

Носій опорної базової точки виконує такі основні функції:

- задає в координатній системі стапеля положення координат однієї з базових точок об'єкта позиціонування;

- забезпечує сполучення з наконечником щупа КВМ або зі сферичним відбивачем лазерного трекера в процесі контролю поточних координат опорної базової точки;

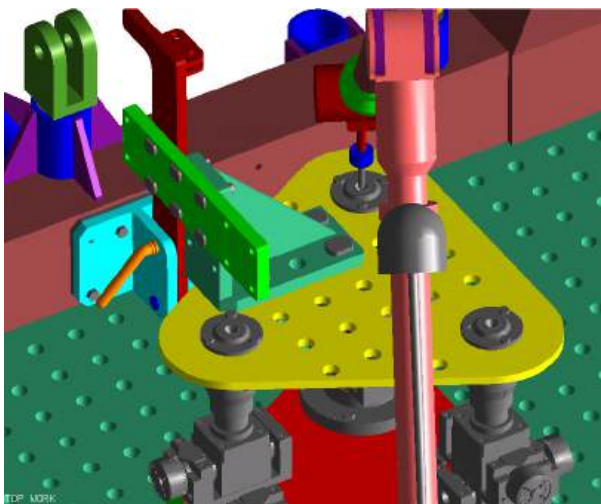
- забезпечує фіксацію робочого й монтажного майданчиків після позиціонування на час закріплення елемента на каркасі стапеля.

Для орієнтації елемента, що базується, кожен із модулів одноточкового позиціонування повинен мати можливість переміщення по лінійних координатах у межах $\pm (10 \dots 20)$ мм щодо нейтрального положення й повороту навколо цих осей в межах $\pm 10^\circ$. Як привід лінійних переміщень у модулі прийнято кінематичну пару «гвинт – гайка». Цей привід найбільш технологічний у виготовленні та дозволяє забезпечувати переміщення з малими контрольованими приростами (близько 0,01 мм).

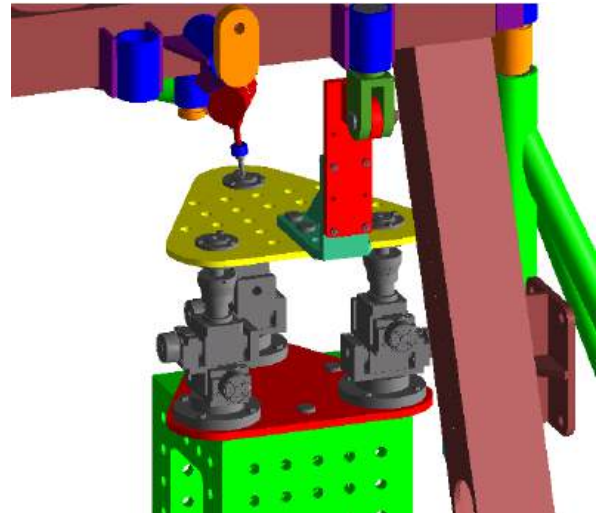
На монтажному майданчику через перехідні фітинги за допомогою шліфованих болтів по отворах діаметром 18 мм закріплюють вилки, що базуються.

Позиціонер закріплюють у просторі стапеля на жорсткій опорі відповідно до конструктивного електронного макета (КЕМ) монтажу. Його положення задається за допомогою простих вимірювальних засобів (лінійка, рулетка). Точного положення носіїв опорних базових точок позиціонера досягають шляхом обертання гвинтів модулів лінійного переміщення та вимірювань за допомогою КВМ.

Поточний контроль координат опорних базових точок позиціонера проводять за допомогою мобільної КВМ (рисунок 5.19).



а



б

Рисунок 5.19 – Комп'ютерна симуляція контролю координат опорних базових точок за допомогою КВМ при монтажі: а – фіксатора; б – вилки

Для задання системи координат стапеля в процесі проектування в його конструкції передбачають спеціальні реперні майданчики (не менше ніж три). Один із цих майданчиків приймають за початок координат стапеля. Щодо цього реперного майданчика задають координати точок позиціонера при монтажі.

Раму стапеля закріплюють нерухомо на рівній поверхні (наприклад, на координатній плиті або фундаменті на підлозі складального цеху). КВМ закріплюють на нерухомій жорсткій опорі відповідно до КЕМ монтажу.

Далі за допомогою КВМ визначають координати отворів трьох реперних майданчиків стапеля (в системі координат КВМ). За центрами цих отворів задають вертикальну площину ZOX . Дотиком щупа КВМ горизонтальних поверхонь двох реперних майданчиків, включаючи базову, задають рівень горизонтальної площини YOX .

Третю площину ZOY віртуально задають через центр отвору базового реперного майданчика. Початок відліку переносять в точку перетинання площин: відбувається ув'язування системи координат стапеля та КВМ.

Технологічні рекомендації щодо монтажу складальної оснастки на базі мобільної КВМ:

- при проектуванні конструкції складальної оснастки необхідно передбачити наявність реперних майданчиків для задання й ув'язування систем координат стапеля та КВМ;

- у конструкції складальної оснастки елементів, що базуються, необхідно передбачити технологічні площини й отвори для кріплення їх через перехідні фітинги на плиті позиціонера.

5.2.2 Монтаж складальної оснастки на базі лазерного трекара

У сучасному варіанті технології безеталонного монтажу великогабаритної складальної оснастки першоджерелом інформації є об'ємна електронна модель, виконана в CAD-системі.

На її основі створюють цифрову модель складальної оснастки у вигляді сукупності базових точок конструктивних елементів у такій системі координат, яку можна відтворити в цехових умовах. Автоматизоване вимірювання просторових координат елементів монтажу складальної оснастки виконують за допомогою лазерного трекара (рисунок 5.20).



а



б

Рисунок 5.20 – Монтаж стапеля крила (а) та фюзеляжу (б) літака за допомогою лазерного трекара

Можливі такі режими координатних вимірювань складальної оснастки на базі лазерного трекера:

- контроль стану реперних точок на фіксаторах обводів і стиків під час монтажу складальної оснастки. При попаданні координат точок у поля допуску лазерний трекер видає звуковий сигнал, який свідчить про точне виставлення базових елементів складальної оснастки;

- періодичний плановий контроль фактичного розташування базових точок на фіксаторах обводів і стиків складальної оснастки з видаванням відхилень від теоретичних значень.

При виготовленні каркаса стапеля обробляють поверхні, призначені для установа базово-фіксуючих вузлів стапеля.

Для задання системи координат пристосування в процесі проектування в конструкції передбачають спеціальні реперні точки з базовими отворами діаметром 12Н8.

Попереднього нівелювання положення базових точок досягають за допомогою регульованих опор пристосування. Базова площина пристосування, на якій розташовані ці точки, виконана з високим допуском на площинність. Одну з цих точок приймають за початок координат, щодо неї задають координати точок при монтажі пристосування.

Узгодження систем координат із електронною моделлю складальної оснастки виконують шляхом вимірювання координат отворів для сферичного відбивача SMR і перехідників (адаптерів) для їх установа на реперних майданчиках стапеля (рисунок 5.21).

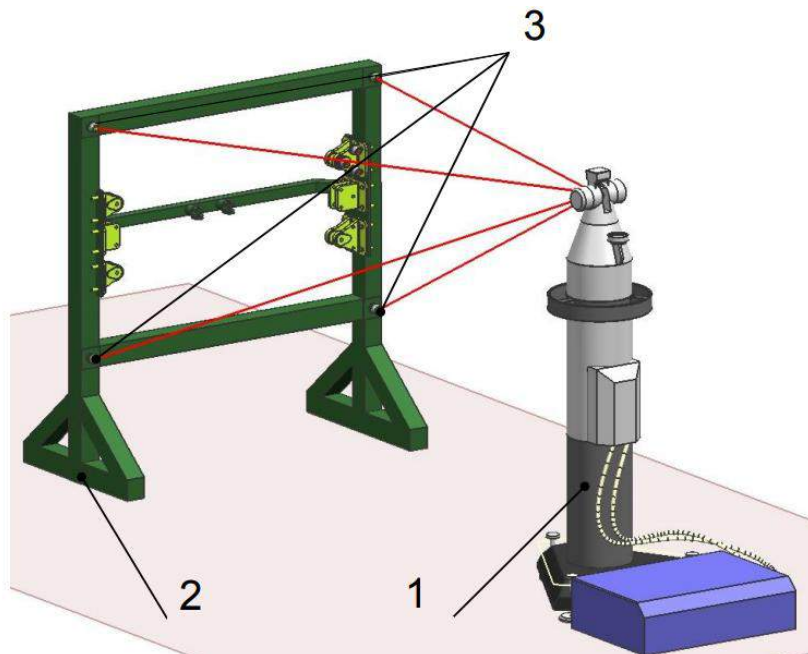


Рисунок 5.21 – Узгодження систем координат стапеля та трекера за допомогою реперних майданчиків: 1 – лазерний трекер; 2 – каркас стапеля; 3 – реперні майданчики

Трекер встановлюють у робоче положення. У реперну точку встановлюють сферичний відбивач ССР. Далі за допомогою трекера автоматично

визначаються координати отворів реперних точок пристосування. За центрами цих отворів задається вертикальна площина ZOX.

Вилки рубильників вставляють у стакани, вилки ложементів попередньо кріплять болтами до рами. Установлення їх у номінальне положення відбувається за допомогою лазерного трекара, що визначає в реальному часі просторові відхилення вузла від номінальних значень.

Місцезнаходження лазерного трекара визначають у процесі розроблення схеми монтажу в віртуальному просторі комп'ютерної інтегрованої системи CAD. При цьому враховують можливі перешкоди при проходженні лазерного променя під час вимірювання координат базових точок стапеля та базових точок елементів оснастки, що встановлюють.

Для установлення перехідників (рисунк 5.22, а) або безпосередньо самих сферичних відбивачів лазерного трекара (рисунк 5.22, б) на елементах конструкції складальної оснастки передбачені спеціальні посадочні місця у вигляді отворів заданого діаметра (рисунк 5.22, в).

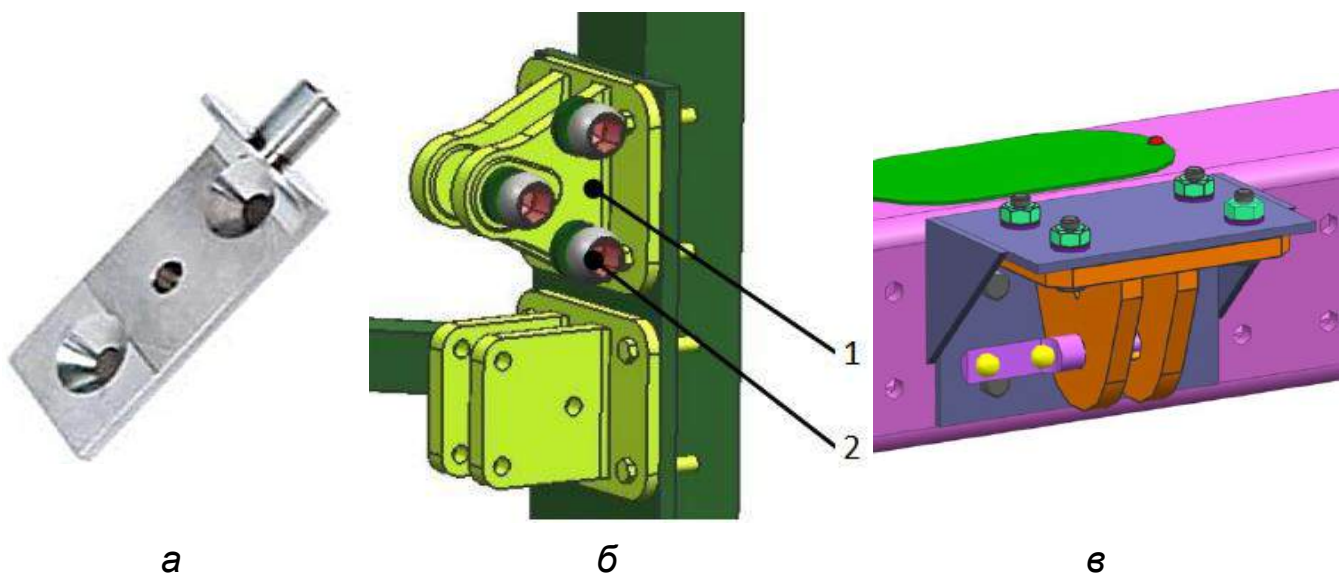


Рисунок 5.22 – Перехідник і посадочні місця на елементах стапеля:
1 – вушко; 2 – сферичний відбивач

Для остаточної фіксації встановлювальних кронштейнів і рубильників у рамі пристосування спільно з майданчиком кронштейна та в рубильнику спільно із закінцівкою свердлять по два отвори та встановлюють штифти.

Змонтовані деталі потрібно остаточно зафіксувати на каркасі складальної оснастки за допомогою штифтів або заливкою сполучної речовини (наприклад, цементу НІАТ-МЦ, епоксидної смоли або іншої полімерної речовини).

5.2.3 Плановий контроль стапелів на базі лазерного трекара

Робоче положення лазерного трекара при проведенні планово-попереджувального контролю складального пристосування слід вибирати так, щоб елементи, які контролюють, не перешкоджали проходженню лазерного променя від трекара та сферичного відбивача ССР.

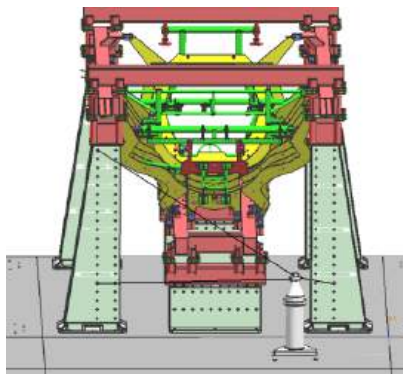
Перевірку положення всіх фіксаторів (ложементів, рубильників) проводять у такій послідовності:

1. Встановлення лазерного трекера у місці, зручному для проведення планового контролю стапеля.

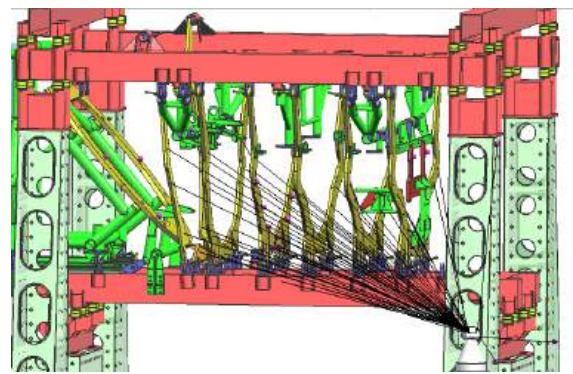
2. Прив'язування лазерного трекера до системи координат стапеля (рисунок 5.23, а).

3. Встановлення сферичного відбивача ССР у базову точку фіксатора (рубильника, ложемента), що перевіряється, проведення контрольного вимірювання координат. На екрані дисплея при цьому відображаються відхилення цієї точки від заданих координат.

4. Перевірка інших фіксаторів і елементів стапеля, що базуються, аналогічним чином (рисунок 5.23, б).



а



б

Рисунок 5.23 – Прив'язування лазерного трекера до системи координат стапеля і вимірювання елементів, що базуються

У режимі планового контролю визначають реальний стан базових точок елементів оснастки та їх відхилення від проектного теоретичного положення. При попаданні координат точок у поле допуску лазерний трекер видає звуковий сигнал.

Контрольні запитання

1. На якому принципі базується вимірювання за допомогою лазерного трекера?

2. Назвіть основні складові елементи лазерного трекера.

3. Надайте послідовність етапів вимірювань лазерним трекером.

4. Які функціональні особливості застосування лазерних трекерів Ви знаєте?

5. Порівняйте функціональні можливості лазерних радарів із лазерними трекерами.

6. Наведіть основні етапи монтажу та контролю складальної оснастки за допомогою лазерного трекера.

7. Наведіть основні етапи планового контролю стапелів на базі лазерного трекера.

6 СКЛАДАННЯ ТА СТИКУВАННЯ АГРЕГАТІВ

Складання є заключним етапом виготовлення планера для виробів авіаційної і/чи корпусу для ракетно-космічної техніки.

Складання планера літака або вертольота організовується за схемою паралельно-послідовних операцій, починаючи зі складання вузлів, панелей, агрегатів і закінчуючи загальним складанням.

На основі розробленої послідовності складальних операцій створюють схему складання, яка є одним з основних технологічних документів для складальних цехів.

При виробництві літаків Boeing 787 і Airbus A350 використання слідкуючих лазерних систем почалося не тільки як засіб геометричного контролю готових виробів і монтажу стапельної оснастки, але й як керуючий елемент автоматичних складальних ліній.

Гнучкі й автоматизовані системи замінюють жорсткі пристосування протягом усього процесу складання літака, наприклад, при виготовленні секцій фюзеляжу з панелей, базування секцій для складання фюзеляжу та стикування крила із центропланом.

Перевагою складання виробів авіаційної та ракетно-космічної техніки за електронним макетом з використанням лазерного трека є повна автоматизація процесу, висока точність виконання операції, контроль складання в реальному масштабі часу за показаннями лазерного трека, а не візуально.

Традиційна конструкція складальної оснастки передбачає жорстко задані складальні бази. Так можна сказати про появу нового виду складальної оснастки – автоматизованих складальних станцій для координатного позиціонування панелей і агрегатів планера літака.

6.1 Переналагоджувана складальна оснастка

Точність фіксаторів обводів і стиків у складальній оснастці визначають на двох етапах технологічної підготовки виробництва:

- виготовлення елементів, що базуються, конструкцій складальної оснастки;

- монтаж елементів, що базуються, на каркасі складальної оснастки.

На багатьох підприємствах авіаційної промисловості монтаж базових елементів виконують вручну за допомогою домкратних гвинтів і калібрувальних прокладок. Процес безеталонного монтажу складальної оснастки за даною технологією є досить трудомістким, оскільки засоби позиціонування не автоматизовані, позиціонування виконується вручну за невизначене число ітерацій.

Для підвищення ефективності технологічної підготовки складального виробництва передбачено комплекс автоматизованого монтажу переналагоджуваної складальної оснастки. Першоджерелом даних є об'ємна електронна модель складальної панелі або іншої складальної одиниці, виконаної в CAD-системі (рисунок 6.1).

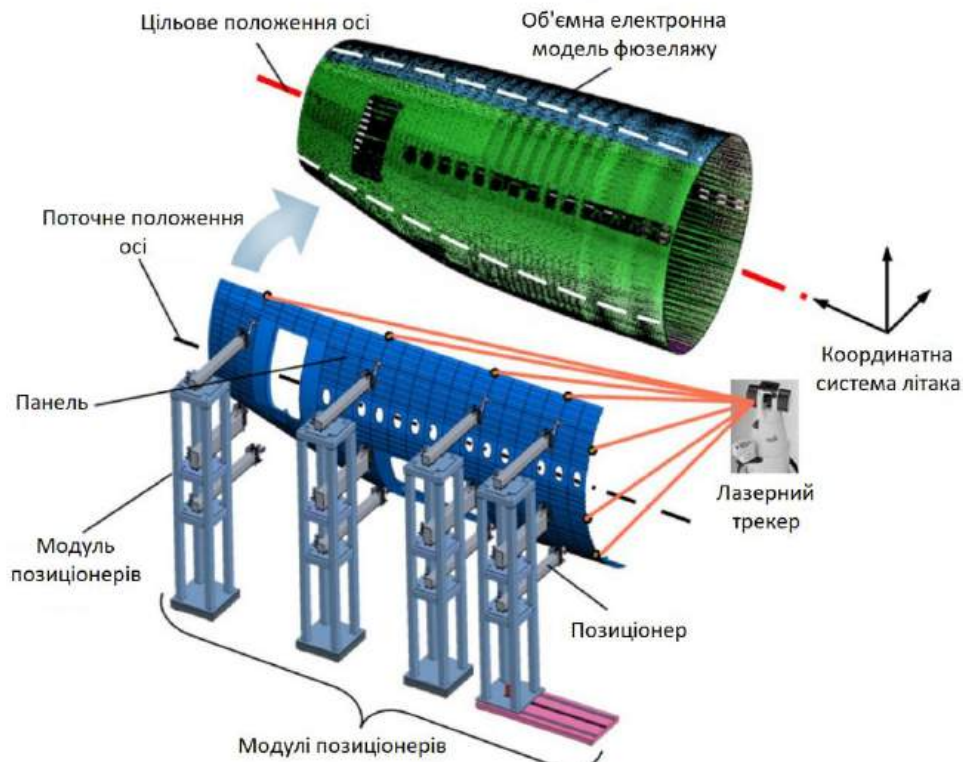


Рисунок 6.1 – Схема переналагоджуваної складальної оснастки

На її основі створюється цифрова модель складальної оснастки у вигляді сукупності базових точок у системі координат, яку можна відтворити в умовах цехів вузлового й агрегатного складань. Автоматизоване вимірювання просторового положення базових елементів складальної оснастки виконують за допомогою лазерного трекера.

6.2 Позиціонування при виробництві та складанні панелей

6.2.1 Позиціонування панелей на висувних штоках

Монолітні панелі незалежно від конфігурації внутрішнього силового набору після формоутворення мають загальні вимоги за точністю. Допуск на відхилення обводу полотна панелей після формоутворення становить від 0,3 до 0,8 мм на 1000 мм довжини.

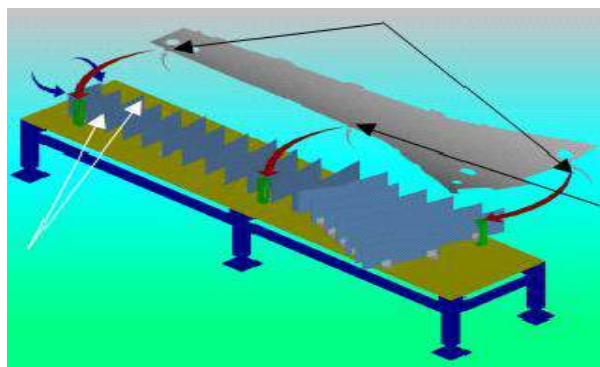
Висока трудомісткість контролю обводу полотна панелей після формоутворення на гідравлічному пресі (рисунок 6.2, а) пов'язана з багаторазовим покроковим повторенням технологічного циклу «формоутворення – контроль», при якому довгомірну монолітну панель транспортують на контрольно-розмірний стенд і назад.

Відповідність форми вимірюють як у вільному стані, так і в допустимо навантаженому, що імітує наступну операцію складання монолітної панелі та каркаса кесона крила (рисунок 6.2, б).

Каркасні конструкції з комплексу шаблонів контуру перетину (ШКП) завдяки своїй просторовій формі забезпечують із достатньою точністю узгодження (ув'язування) розмірів деталей каркаса та формованих монолітних панелей планера (рисунок 6.2, в).



а



б



в

Рисунок 6.2 – Контрольно-розмірний стенд: а – формування монолітної панелі методом вільного гнуття; б – схема контролю форми панелі; в – кошик шаблонів контуру перетину на стенді

Перехід на сучасні безплазові методи ув'язування та комп'ютерні інтегровані технології завдяки використанню верстатів із ЧПК зменшує кількість етапів перенесення розмірів складальних одиниць.

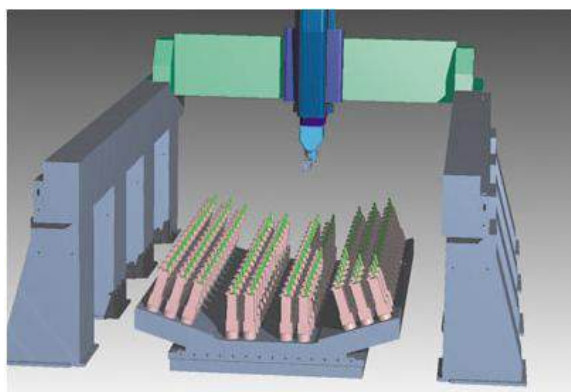
Узгодження (ув'язування) забезпечується єдиною комп'ютерною моделлю виробу в цифровій системі оброблення інформації.

Однак технологічні засоби просторової координації форми та розмірів складальних одиниць, у тому числі й монолітних панелей, як і раніше, залишаються необхідними. Дані технологічні засоби є індивідуальними для кожного об'єкта виробництва.

Компанія MTorres (Іспанія) є розробником і виробником принципово нової переналагоджуваної технологічної оснастки для виготовлення, контролю й базування великогабаритних деталей і складальних одиниць сучасної авіаційної техніки. Застосування такої переналагоджуваної технологічної оснастки є ефективним при обробленні на п'ятикоординатних верстатах із ЧПК листових деталей, які призначені для створення складально-монолітних панелей крила й фюзеляжу.

На рисунку 6.3, а показано схему багатоопераційного верстата із ЧПК для механічного оброблення металевих або композитних обшивок після формоутворення. Відформовані обшивки базують на позиціонерах із лінійними актуаторами моделі FESTO DNCE штокового типу з вакуумними кульовими опорами (рисунки 6.3, б).

Кожен із позиціонерів попередньо виставлений в необхідне за високою положення оператором верстата із ЧПК (рисунок 6.3, в). Аналогічно базують і надають жорсткість листовим обшивкам збірних панелей на клепальних автоматах (рисунок 6.3, г).



а



б



в



г

Рисунок 6.3 – Позиціонування обшивок на висувних штоках

Координатні вимірювання, проведені безпосередньо на верстаті лазерним треком у реальному масштабі часу, забезпечують ефективну реалізацію принципу адаптивного керування базуванням і точністю оброблення (рисунок 6.4).



а



б

Рисунок 6.4 – Горизонтальне (а) та вертикальне (б) позиціонування композитної панелі при механічному обробленні

Складальні пристосування компанії MTorres із функціональними елементами автоматизованого позиціонування для забезпечення жорсткості на етапах складання, базування та фіксації композитних панелей крила літака (рисунк 6.5) забезпечують підвищення продуктивності складально-монтажних робіт на 25 ... 30%.



а



б

Рисунок 6.5 – Стапель складання крила з висувними штоками у вихідному положенні (а) та після установалення композитних панелей (б)

Механізовані складальні пристосування компанії MTorres за допомогою лазерного трекера дозволяють реалізувати різні способи базування: по каркасу, ложементах і упорах до поверхні обшивки, а також по мобільних базово-фіксуючих елементах.

6.2.2 Позиціонування панелей при автоматичному клепанні

Необхідність застосування автоматичного клепального обладнання зумовлена високими вимогами, що пред'являють до якості клепаних з'єднань сучасних виробів авіаційної техніки.

Світовими лідерами в розробленні клепальних автоматів є три компанії: Electroimpact (США), Gemcor (США) і Brotje (Німеччина).

Клепальні автомати всіх компаній здатні встановлювати різні кріплення (заклепки, болти, болт-заклепки) діаметром від 3 до 7 мм і оснащені пристроєм подачі герметика. Клепальні системи застосовують для автоматичного клепання панелей фюзеляжу та крила, мотогондол і повітрозабірників без проміжного розкладання та складання пакета деталей.

Нові технологічні можливості клепальних автоматів при виробництві виробів авіаційної техніки забезпечили високоточні електричні кулькові приводи із ЧПК замість класичного гідроприводу й лазерні контрольно-вимірювальні системи (рисунк 6.6).



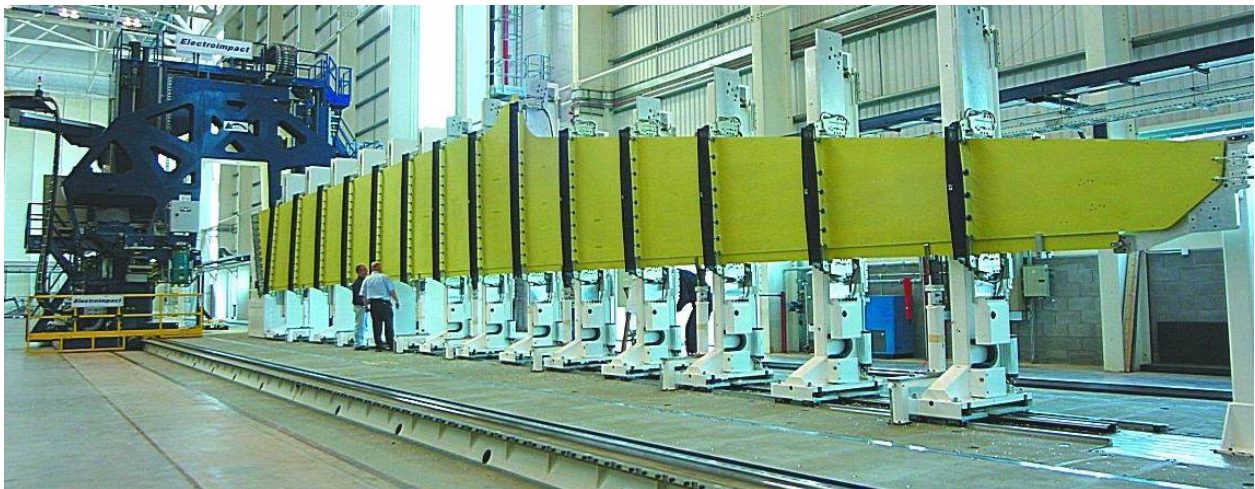
а



б



в



г

Рисунок 6.6 – Силовий привід і підтримно-компенсаційний пристрій клепацького автомата: а – силовий привід;
б – контроль установлення стрингерів лазерним трекером;
в – позиціонери стрингерного набору; г – позиціонери обшивки

У процесі виконання операцій покрокового й порядного позиціонування автоматично здійснюється контроль і керування розміром перемишки за допомогою контакту датчиками, а також перпендикулярність поверхні панелі, що складається, й осі силових головок за допомогою слідкуючих тактильних щупів системи орієнтації силових головок.

Оператор за допомогою відеокамери, що передає зображення знаків осі заклепки на монітор пульта керування, в ручному режимі задає координати нульової точки, від якої починається позиціонування на крок клепаання з одночасним процесом виконання автоматичного циклу постановки заклепувального з'єднання.

Для базування та закріплення окремих панелей при утворенні секції крила застосовують позиціонери з рухомими всередині ложементами (рисунки 6.7, а) та Г-подібними прихоплювачами, які притискають полки стрингерів до рубильників (рисунки 6.7, б).

По краях кожна панель притискається до макетної кореневої нервюри за допомогою електромагнітних притисків (рисунок 6.7, в).

На позиціонерах із висувними вилками базують рубильники різної довжини (рисунок 6.7, а).



а



б



в



г

Рисунок 6.7 – Позиціонери комплекту панелей секції крила клепального автомата компанії Electroimpact

Попередньо складену панель базують поза робочої позиції на ложе-ментах рамної касети та встановлюють на підтримно-компенсаційному пристрої клепального автомата. Два вертикальних позиціонери з поворотними пристроями (рисунок 6.8, а) орієнтують касету перпендикулярно осі клепального автомата (рисунок 6.8, б).



а



б

Рисунок 6.8 – Позиціонери вертикального та кутового положень касети в клепальному автоматі компанії Gemcor

Для автоматичного клепа́ння відсіків фюзеляжу, складених із панелей одинарної та подвійної кривизни, застосовують поворотні й осьові позиціонери (рисунок 6.9, б).



а



б

Рисунок 6.9 – Поворотні та лінійні позиціонери для відсіків фюзеляжу в клепальному автоматі компанії Brotje

Уніфікована система ЧПК Programmable Logic Controller для всіх клепальних автоматів має програми позиціонування по кроку та ряду клепа́ння й орієнтації складання панелі, а також інструмента в просторі при автоматичному складанні клепа́них панелей і вузлів.

6.2.3 Позиціонування панелей при стапельному складанні

Після проведення автоматичного клепа́ння касету з панеллю витягують із робочої зони клепального автомата (рисунок 6.10, а) та транспорту́ють до стапеля складання секцій або відсіків, де спеціальний кантувач із дистанційним керуванням (рисунок 6.10, б) витягує панель із рамної касети та закладає в стапель.



а



б

Рисунок 6.10 – Підготовка панелі для складання секції в стапелі

Для складальних пристосувань основною цільовою функцією, яка визначається компоувальною схемою складального пристосування, є забезпечення складання виробу із заданими параметрами точності й технологічності. Важливою особливістю автоматичного складання агрегатів є виконання координатних вимірювань за допомогою лазерного трекера й позиціонування безпосередньо в процесі складання.

Компанія Dürr Systems GmbH (Німеччина) займає провідне становище на світовому ринку розроблення та виготовлення автоматизованих складальних стендів для виробів авіаційної та ракетно-космічної техніки.

Автоматизований стенд клепа́ння панелей фюзеляжу містить позиціонери німецької компанії Dürr (рисунок 6.11, а), які реалізують концепцію модульної та реконфігурованої технології просторового позиціонування з шістьма степенями вільності.

На рисунку 6.11, б показано установа́ння панелі фюзеляжу на стоякові позиціонери моделі EcoPositioner компанії Dürr у стенді автоматичного клепа́ння.



а



б

Рисунок 6.11 – Загальний вигляд позиціонера моделі EcoPositioner (а) і розташування панелі фюзеляжу на позиціонерах (б)

Для складання відсіків фюзеляжу з панелей застосовують спеціальні стапелі. Вони являють собою комплект колон (рисунок 6.12, а) з висувними консольними позиціонерами (рисунок 6.12, б), які програмно об'єднані з лазерним трекером у єдину систему координат.



а



б

Рисунок 6.12 – Стапель для автоматизованого складання відсіків фюзеляжу з панелей (Airbus A350)

Для високоточних лінійних переміщень висувних штоків із вакуумними кульовими опорами застосовують силові роликові напрямні фірми Schneeberger і шарикові пари фірми Bosch Rexroth (обидві – Німеччина).

Кожен із консольних позиціонерів моделі EcoPositioner має площадку з реперною точкою, яка є посадковим місцем під сферичний відбивач CCR лазерного трекера.

6.2.4 Роботизація складальних процесів

Роботизація складальних процесів пов'язана з розробленням системи транспортних і маніпулюючих механізмів, які вигідно заміщують руку людини при здійсненні нею координованих рухів і порівнювальних дій, необхідних для виконання операцій складання.

Першоджерелом автоматизації даних координованих рухів стає електронний макет виробу, що складається, а засобом високоточного контролю в масштабі реального часу – лазерний трекер.

Спочатку виставляють положення лазерного трекера щодо системи координат складальної оснастки. Для контролю переміщення виконавчих механізмів промислових роботів компанії KUKA (США) при автоматичному клепанні на базі лазерного трекера застосовують вимірювальний сканер моделі Leica T-Mac (рисунок 5.12, б).

За його допомогою на конструкції, що складається, задають покрокове та рядкове положення отворів, починаючи від нульової точки. Результат вимірювання використовують для автоматизованого розпізнавання елементів конструкції в системі координат лазерного трекера.

Маніпулятори KUKA виконують автоматичне клепання з високою точністю позиціонування не більше 0,25 мм у тандемі: один встановлює та розклепує кріплення, а інший, всередині відсіку фюзеляжу, притискає до пакета підтримувач (рисунок 6.13, а).

Лазерний трекер крізь вимірювальний сканер моделі Leica T-Mac передає виробничому роботу відповідні команди для коректування положення клепальної головки або підтримувача (рисунок 6.13, б).



а



б

Рисунок 6.13 – Роботизоване клепання відсіку фюзеляжу на базі лазерного трекера й роботів компанії KUKA (Boeing 787)

Спочатку промислові роботи компанії KUKA універсального призначення застосовували як свердлильно-зенкувальні установки (СЗУ) з осьовими та кутовими позиціонерами для отримання отворів під потайні головки заклепок і болтів (рисунок 6.14).



а



б

Рисунок 6.14 – Роботизована СЗУ для оброблення панелей одинарної (а) та подвійної (б) кривизни

У 2017 році науково-дослідний підрозділ авіаційної компанії Boeing Research & Technology (BR&T) запатентував повністю автоматизований завод з виробництва фюзеляжу літака.

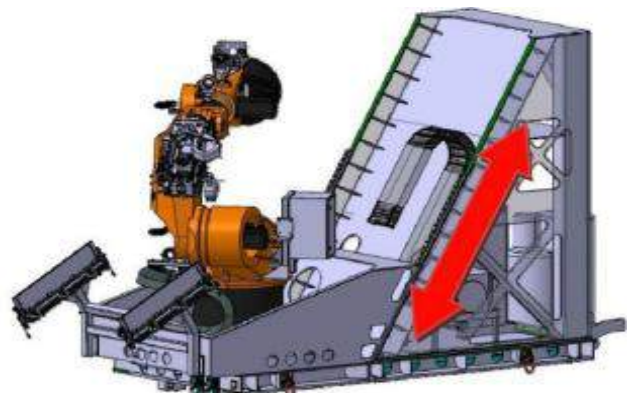
За допомогою сучасних промислових роботів в автоматичному режимі може виконуватися повний цикл складальних операцій для вузлів, панелей, секцій і відсіків виробів авіаційної техніки:

- позиціонування складальної конструкції в робочій зоні;
- оброблення отворів (свердлування, розгортання й зенкування);
- нанесення ґрунту й герметика;
- подача, установлення й затягування кріпильного елемента;
- переміщення складеної конструкції з робочої зони;
- повернення на початок циклу.

Компанією Broetje для авіаційної промисловості був розроблений новий спеціалізований робот моделі Power RACE (рисунок 6.15).



а



б

Рисунок 6.15 – Загальний вигляд моделі Power RACE (а) та його компоновальна схема (б)

Даний робот оснащений двома розділеними одна від одної системами високоточного позиціонування. Системи позиціонування з десятима степенями вільності забезпечують синхронне переміщення верхнього та нижнього змінних модулів із збільшеним зусиллям стиснення пакета.

6.3 Стикування агрегатів літаків і ракет

Основними елементами стикувальних стендів є візки та домкрати для переміщення агрегатів літаків і ракет (рисунк 6.16).



а



б

Рисунок 6.16 – Стикувальний стенд відсіків фюзеляжу літака (а) та ступенів корпусу ракети (б)

Установлення агрегатів літаків і ракет, що стикуються, виконують за допомогою візків і домкратів стенда шляхом поєднання з необхідною точністю реперних точок із вимірювальними пристроями стенда. Після стикування агрегатів виконують спільне оброблення стикових отворів і контроль установлення агрегатів по реперних точках за допомогою оптичних приладів – нівелірів і теодолітів.

Процес стикування агрегатів має тривалий цикл із великим обсягом розмічувальних і підгінних робіт ручного характеру та потребує високої кваліфікації слюсарів-складальників.

Перевагою стикування агрегатів планера за електронним макетом із використанням лазерних трекерів або радарів є повна автоматизація процесу, висока точність виконання стикування, дистанційний контроль із пульта керування в реальному масштабі часу за показниками приладу, а не візуально.

Щоб використовувати такий метод стикування, необхідна повна 3D-модель виробу, парк верстатів із ЧПК, монтаж автоматизованого стапеля, його налаштування та введення в експлуатацію. Все це потребує великих матеріальних вкладень. Цей метод є ефективним для виробництва нової серійної аерокосмічної техніки.

Автоматичне складання – це процес переміщення агрегатів, що стискаються, розміщених на позиціонерах, до їх номінального положення в складеному вигляді (рисунк 6.17).



а



б



в

Рисунок 6.17 – Схема автоматичного стикування відсіків фюзеляжу (а), крила з центропланом (б) і монтажу мотогондולי (в)

Лазерний трекер безперервно вимірює фактичне становище агрегату щодо його комп'ютерної моделі, дані надходять до загального контролера стенда. Виробляється сигнал неузгодженості для електромеханічних приводів позиціонерів, які переміщують агрегат в його номінальне положення.

Для стикування відсіків фюзеляжу між собою й окремої частини крила з центропланом застосовують автоматичні стенди виробництва компанії Broetje. До складу стендів входять позиціонери й лазерні трекари, керування якими інтегровано в систему керування стендами.

Позиціонери (рисунок 6.18) оснащені посадковими місцями під вузли навішування відсіків і агрегатів, а також реперними майданчиками для сферичних відбивачів CCR лазерного трекера.



а



б



в

Рисунок 6.18 – Позиціонери для переміщення (а) та повороту (б) відсіків та агрегатів планера літака (Airbus A400M)

Ланкою, що з'єднує між собою агрегат і позиціонер автоматичного стенда стикування, є такелажно-базуючі вузли (ТБВ). У вузлах сполучення ТБВ і конструкції агрегатів не мають виникати деформації, що перевищують розрахункові. Синхронізація переміщення позиціонерів при стикуванні контролюється автоматично, оскільки неузгодженість навіть у невеликих межах може призвести до деформації агрегату.

Перед реальним стикуванням агрегатів проводять комп'ютерне «віртуальне стикування», яке дозволяє оптимізувати процес складання ще до початку переміщення багатотонних агрегатів.

На рисунку 6.19, а показано стенд із фюзеляжем транспортного літака Airbus A400M після автоматичного стикування, на рисунку 6.19, б – розташування позиціонерів і лазерного трекера для стикування консолей крила з центропланом пасажирського літака Sukhoi Superjet 100.

Для навішування мотогондол двигунів застосовують спеціалізовані позиціонери чеської компанії HENNLICH (рисунок 6.19, в).



а



б



в

Рисунок 6.19 – Позиціонери для автоматичного стикування агрегатів

Серійна технологія автоматичного стикування агрегатів літака була реалізована в 2007 році компанією Airbus. У Росії цю технологію використовує корпорація «Іркут» для складання літаків SSJ100 і MC-21.

Контрольні запитання

1. У чому суть сучасної переналагоджуваної складальної оснастки при виробництві та складанні панелей?

2. Яку функцію виконують позиціонери в переналагоджуваній складальній оснастці?

3. Охарактеризуйте повний цикл роботизації складальних процесів на базі лазерного трекера.

4. Наведіть основні особливості стикування та складання агрегатів літаків і ракет за електронним макетом.

7 ЛАЗЕРНА ПРОЕКЦІЙНА СИСТЕМА

Вироби авіаційної та ракетно-космічної техніки з композиційних матеріалів складаються з шарів листового препрегу, покладених один на одного. Для підвищення якості виробів із КМ застосовують лазерну проекційну систему CAD-PRO компанії LAP (Німеччина).

За допомогою спроектованих світлових контурів червоного та зеленого кольорів (рисунок 7.1, а) користувач вручну укладає заготовки шарів КМ на поверхню проекції (рисунок 7.1, б).

Поверхня, на яку здійснюється лазерне проєціювання, може бути плоскою, опуклою або увігнутою; області проєціювання можуть бути суміжними, а також частково або повністю накладатися одна на одну (рисунок 7.1, в).

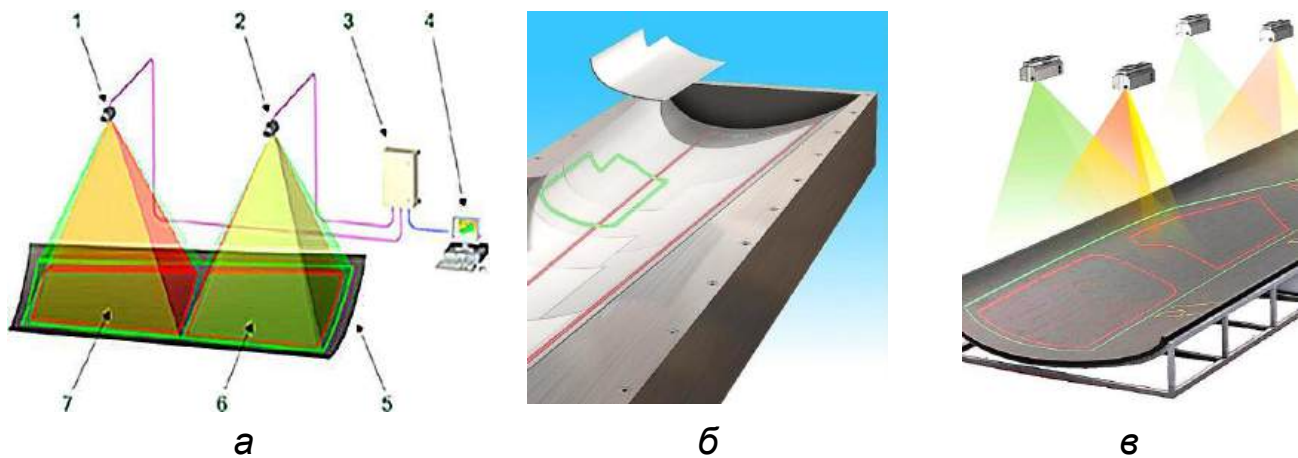


Рисунок 7.1 – Схема лазерної проекційної системи:

1,2 – лазерні проектори; 3 – блок комутації; 4 – комп'ютер;
5 – поверхня проекції; 6, 7 – кольоровий світловий контур

Оператор керує проекційною системою, використовуючи інтерфейс комп'ютера з програмним забезпеченням PRO-SOFT і пульт дистанційного керування. Одна система може контролювати до 16 проекторів CAD-PRO. Точність лазерної проекційної системи моделі CAD-PRO LD становить $\pm 0,2$ мм/м, моделі CAD-PRO HP – $\pm 0,06$ мм/м, максимальний кут проєкування – 80° .

Першоджерелом системи лазерного проектування є електронні моделі виробів, шарів і оснастки для викладання цих шарів, які імпортують у прикладну комп'ютерну систему Fibersim проектування композитних виробів. На етапі створення електронної моделі шарів виробу задають метод їх формування.

Пошаровий метод застосовують для виробництва об'єктів лінійчатої форми типу закрилків або елеронів, для чого використовують модуль Fibersim CEE (Composite Engineering Environment).

Для складних виробів подвійної кривизни типу відсіків фюзеляжу або панелей крила використовують методи зонного проектування за допомогою модуля Fibersim ACEE (Advanced Composite Engineering Environment).

По завершенні формування шарів користувач отримує вичерпні, асоціативно пов'язані з вихідною геометрією тривимірні дані про виріб – набір автоматично формованих пошарових розверток матеріалу.

У процесі викладення для точного позиціонування оснастки щодо лазерного проектора проекційній системі необхідні опорні точки. Фізично опорні точки реалізовані у формі оптичних мішеней, які вставляють в отвори технологічної оснастки. Позиції цих мішеней мають бути ув'язані з точками в робочому файлі для лазерного проектора.

Автоматичний розкрій препрегу для виробів із КМ виконують на плотерах американської фірми Eastman, які оснащені конвеєрною системою для виконання безперервного розкрою заготовок з рулону препрегу (рисунок 7.2, а).

Швидкість розкрою – 1 м/с, ширина робочої зони столу залежно від потреби замовника – 0,8 ... 3,0 м, довжина робочої зони – 0,8 ... 3,0 м, абсолютна похибка розкрою – $\pm 0,01$ мм.

В умовах дослідного й серійного виробництва розкрій рулонного препрегу також виконують ручними механізованими ножицями по лініях від лазерного проектора (рисунок 7.2, б).



а



б

Рисунок 7.2 – Автоматичний і ручний розкрій заготовок композитних виробів із рулону препрегу

Подальшим розвитком систем лазерного проектування є технологія віртуальної реальності Active Stereo, яка розроблена фахівцями лабораторії Центру прикладних авіаційних досліджень ZAL у Гамбурзі.

Контрольні запитання

1. Для яких конструкцій та їх матеріалів застосовують лазерні проекційні системи? Як вони працюють?
2. Назвіть особливості використання лазерних проекційних систем для конструкцій із КМ.

ВИСНОВКИ

З розвитком комп'ютерних інтегрованих технологій CAD/CAM зростає актуальність впровадження комп'ютеризованих вимірювальних систем у технологічні процеси складання та випробування виробів авіаційної та ракетно-космічної техніки.

Високоточні лазерні методи контролю забезпечують вимірювання лінійних і кутових величин, курування установленим агрегатів і вузлів у процесі складання, отримання об'єктивних результатів вимірювань.

Використання стаціонарних і мобільних КВМ і лазерних методів контролю у виробництві дає можливість точніше виконувати технологічні вимоги в процесі складальних робіт і тим самим забезпечує надійну роботу агрегатів при експлуатації.

Впровадження високоточних лазерних вимірювальних систем дозволяє перейти від CAD/CAM-технологій до інтегрованих CAD/CAM/CAI-технологій.

Керування параметрами лазерного випромінювання як у просторовому (структуровані пучки), так і тимчасовому (тривалість імпульсів, частота електромагнітної хвилі) сенсі сприяє подальшому розширенню застосування безконтактних методів вимірювання геометричних параметрів виробів.

Можна свідчити про становлення нового класу високоточної вимірювальної техніки, невід'ємними компонентами якої є формувачі цифрових зображень структурованих лазерних пучків, а геометричні параметри виробів, що вимірюються, виходять у результаті їх оброблення. Процес становлення методів лазерного контролю пов'язаний з подоланням численних суперечок методологічного, метрологічного та технічного характеру.

Розглянувши можливості застосування лазерних трекерів і радарів під час контролю та складання виробів аерокосмічної промисловості, можна зробити висновок про те, що його використання можливе в широкому спектрі завдань вимірювань і контролю:

- заміна великої номенклатури вимірювальних засобів одним;
- скорочення кількості персоналу;
- скорочення трудомісткості виконання операцій контролю;
- можливість автоматизації вимірювальних процесів.

Використання коротких і надкоротких лазерних імпульсів зводить багато завдань динамічних вимірювань до статичних, усуваючи вплив вібрацій і зсувів об'єкта контролю.

В Україні, як і у всіх країнах-виробниках авіаційної, ракетно-космічної техніки та важкого машинобудування, стаціонарні та мобільні КВМ, лазерні сканери промислових виробів, лазерні трекери та лазерні радари внесені до Державного реєстру засобів вимірювання.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Координатно-измерительные машины и комплексы [Текст] / А. И. Пекарш, С. И. Феоктистов, Д. Г. Колыхалов, В. И. Шпорт // Наука и технологии в промышленности. – М.: ООО “РУСИНТЕР”, 2011. – Вып. 3. – С. 36 – 48.
2. Зубарев, Ю. М. Автоматизация координатных измерений [Текст]: учеб. пособие / Ю. М. Зубарев, С. В. Косаревский, Н. Н. Ревин. – СПб.: Изд-во ПИМаш, 2011. – 160 с.
3. Современные технологии агрегатно-сборочного производства самолётов / А. И. Пекарш, Ю. М. Тарасов, Г. А. Кривов и др. – М.: Аграф-пресс, 2006. – 304 с.
4. Технология изготовления и формообразования монолитных и сборно-монолитных панелей самолёта [Текст]: монография / В. Т. Сикульский, В. В. Воронько, Ю. В. Дьяченко и др. – Харьков.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьков. авиац. ин-т», 2015. – 104 с.
5. Вагнер, Е. Т. Лазеры в самолётостроении [Текст] / Е. Т. Вагнер. – М.: Машиностроение, 1982. – 184 с.
6. Вагнер, Е. Т. Лазерные и оптические методы контроля в самолётостроении [Текст] / Е. Т. Вагнер, А. А. Митрофанов, В. Н. Барков. – М.: Машиностроение, 1977. – 176 с.
7. Барвинок, В. А. Сборочные, монтажные и испытательные процессы в производстве летательных аппаратов [Текст] / под ред. В. А. Барвинка. – М.: Машиностроение, 1996. – 576 с.
8. ДСТУ 2232-93. Базування та бази в машинобудуванні. Терміни та визначення. – Введ. 01.07.94. – Київ.: Держстандарт України, 1994. – 35 с.
9. Кривов, Г. А. Технология самолётостроительного производства [Текст] / Г. А. Кривов. – Киев.: КВІЦ, 1997. – 459 с.
10. Клименко, В. Ю. Реверсный инжиниринг: учеб. пособие / В. Ю. Клименко. – Запорожье, 2009. – 116 с.
11. Гребеников, А. Г. Методология интегрированного проектирования и моделирования сборных самолётных конструкций [Текст] / А. Г. Гребеников. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 2006. – 532 с.
12. Информационные технологии в наукоёмком машиностроении: Компьютерное обеспечение индустриального бизнеса [Текст] / под общ. ред. А. Г. Братухина. – Киев: Техніка, 2001. – 728 с.
13. API Product Specifications Tracker 3 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://apitechnical.com/Downloads/2012/T3-Product-Specifications.pdf>.
14. Бехметьев, В. И. Автоматизация технологической подготовки производства авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов // Наука без границ. – 2017. – № 4 (9). – С. 10-19.

Зміст

ВСТУП.....	3
1 ОСНОВНІ ТЕРМІНИ В ГАЛУЗІ МЕТРОЛОГІЇ.....	4
1.1 Характеристика найбільш уживаних із стандартизованих термінів.....	5
1.2 Поняття вимірювання.....	6
1.2.1 Поняття результату й похибки вимірювання.....	7
1.2.2 Поняття, що пов'язані з вимірюванням.....	7
1.3 Геометричні параметри деталей.....	8
1.3.1 Відхилення й допуски форми.....	9
1.3.2 Відхилення й допуски розташування поверхонь.....	9
2 КООРДИНАТНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ МАШИНИ.....	11
2.1 Координатне вимірювання заготовок і деталей.....	11
2.1.1 Основні терміни в галузі координатних вимірювань.....	11
2.1.2 Координатне вимірювання на верстатах із ЧПК.....	11
2.1.3 Контроль траєкторії руху інструмента.....	13
2.1.4 Візуалізація послідовності процесу оброблення.....	17
2.2 Компонування стаціонарних КВМ.....	17
2.2.1 Портальне комплектування КВМ.....	18
2.2.2 Мостове комплектування КВМ.....	20
2.3 Компонування мобільних КВМ.....	23
3 КОМП'ЮТЕРИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КООРДИНАТНИХ ВИМІРЮВАНЬ....	26
3.1 Програмне забезпечення Power INSPECT.....	26
3.2 Методика виконання координатних вимірювань.....	28
3.2.1 Контроль штампувальної оснастки.....	29
3.2.2 Контроль аеродинамічної продувної моделі.....	30
3.2.3 Реінжиніринг методом контактних вимірювань.....	31
4 ТЕХНОЛОГІЯ РЕІНЖІНІРИНГУ ПРОМИСЛОВИХ ВИРОБІВ.....	34
4.1 Типові етапи процесу реінжинірингу.....	34
4.2 Методи реінжинірингу промислових виробів.....	36
4.3 Лазерне сканування промислових виробів.....	40
4.3.1 Принцип тріангуляції лазерного сканування.....	40
4.3.2 Ручне лазерне сканування.....	43
4.3.3 Тривимірний лазерний сканер.....	45
4.3.4 Особливості розроблення комп'ютерної моделі прототипу виробу.....	49
4.4 Програмне забезпечення лазерного реінжинірингу виробів.....	52
4.4.1 Система CopyCAD.....	52
4.4.2 Система Magics RP.....	52
4.4.3 Система Geomagic Studio.....	53
4.4.4 Система тривимірного лазерного сканування Leica Cyclone.....	55
5 КООРДИНАТНІ ВИМІРЮВАННЯ ЛАЗЕРНИМ ТРЕКЕРОМ.....	56
5.1 Принцип вимірювання лазерним трекером.....	56

5.1.1 Технічні характеристики лазерних трекерів.....	58
5.1.2 Функціональні особливості застосування лазерних трекерів.....	59
5.1.3 Функціональні можливості лазерного радара.....	64
5.1.4 Програмне забезпечення для лазерних трекерів і радарів.....	68
5.2 Монтаж і контроль складальної оснастки лазерним трекером..	68
5.2.1 Монтаж складальної оснастки на базі мобільної КВМ.....	70
5.2.2 Монтаж складальної оснастки на базі лазерного трекера.....	72
5.2.3 Плановий контроль стапелей на базі лазерного трекера.....	74
6 СКЛАДАННЯ ТА СТИКУВАННЯ АГРЕГАТИВ.....	76
6.1 Переналагоджувана складальна оснастка.....	76
6.2 Позиціонування при виробництві та складанні панелей.....	77
6.2.1 Позиціонування панелей на висувних штоках.....	77
6.2.2 Позиціонування панелей при автоматичному клепанні.....	80
6.2.3 Позиціонування панелей при стапельному складанні.....	83
6.2.4 Роботизація складальних процесів.....	85
6.3 Стикування агрегатів літаків і ракет.....	87
7 ЛАЗЕРНА ПРОЕКЦІЙНА СИСТЕМА.....	90
ВИСНОВКИ.....	92
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	93
ЗМІСТ.....	94

Навчальне видання

**Бичков Ігор Валерійович,
Майорова Катерина Володимирівна,
Воронько Ірина Олексіївна та ін.**

СУЧАСНІ МЕТОДИ КООРДИНАТНИХ ВИМІРЮВАНЬ В АВІА- ТА РАКЕТОБУДУВАННІ

Редактор Т. Г. Кардаш

Зв. план, 2019

Підписано до видання 02.09.2019

Ум. друк. арк. 5,3. Обл.-вид. арк. 6. Електронний ресурс

Видавець і виготовлювач
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17
<http://www.khai.edu>
Видавничий центр «ХАІ»
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17
izdat@khai.edu

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001