

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інститут інформатики та радіоелектроніки,
Факультет радіоелектроніки та телекомунікації
(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра інформаційних технологій електронних засобів
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

бакалавра

(ступінь вищої освіти)

на тему «ГРАФІЧНА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ СКЛАДАЛЬНОГО
ПРОЦЕСУ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ У САПР»

Виконав: студент 4 курсу, групи РТ-518сп

Спеціальності 172 Телекомунікації та
радіотехніка

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Інтелектуальні технології мікросистемної
радіоелектронної техніки

Бучко І.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник Фурманова Н.І.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Неласа Г.В.

(прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут, факультет Інститут інформатики та радіоелектроніки,
Факультет радіоелектроніки та телекомунікацій
Кафедра інформаційних технологій електронних засобів
Ступінь вищої освіти бакалавр
Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
(код і найменування)
Освітня програма (спеціалізація) Інтелектуальні технології мікросистемної
радіоелектронної техніки
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. зав. Каф. ІТЕЗ Огренич Є.В.,
канд. техн. наук
« 31 » Травня 2021 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА

Бучко Ігора Володимировича
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Графічна візуалізація складального процесу
радіоелектронних пристроїв у САПР
керівник проєкту (роботи) Фурманова Наталія Іванівна, канд. техн. наук, доцент,
доцент кафедри інформаційних технологій електронних
засобів

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом закладу вищої освіти від «26» квітня 2021 року
№161

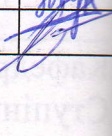
2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 1 червня 2021
року

3. Вихідні дані до проєкту (роботи): рекомендована література, технічне завдання
методи візуалізації

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1
Особливості складання приладів РЕА. 2 Огляд існуючих способів графічної
візуалізації процесів складання. 3 Методика створення графічної візуалізації
процесу складання

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
18 рисунків; 1 таблиця; презентація роботи

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада Консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	Прізвище, ініціали та дата виконання завдання
Розділи 1-3	Фурманова Н.І., доц.	05.04	
Нормоконтроль	Поспеева І.Є., ст. викладач	28.05	

7. Дата видачі завдання «26» квітня 2021 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Прізвище, ініціали та дата виконання
1	Визначення тематики роботи та постановка задачі	1 тиждень	Виконано
2	Аналіз особливостей складання приладів РЕА	2 тиждень	Виконано
3	Оформлення першого розділу пояснювальної записки	3 тиждень	Виконано
4	Аналіз існуючих способів графічної візуалізації	4 тиждень	Виконано
5	Оформлення другого розділу пояснювальної записки	5 тиждень	Виконано
6	Моделювання приладу	6 тиждень	Виконано
7	Оформлення третього розділу пояснювальної записки	7 тиждень	Виконано
8	Оформлення пояснювальної записки	8 тиждень	Виконано
9	Нормоконтроль та рецензування	8 тиждень	Виконано
10	Захист роботи	9 тиждень	Виконано
11			
12			
13			
14			
15			

Студент

(підпис)

Бучко І.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник проєкту (роботи)

(підпис)

Фурманова Н.І.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної кваліфікаційної роботи бакалавра:
61с., 1табл., 18 рис., 25 джерел.

Об'єкт дослідження — особливості графічної візуалізації процесу складання РЕА.

Метою роботи є впровадження методики графічної візуалізації процесу складання на підприємствах.

Метод дослідження — моделювання у САПР верхнього рівня Siemens NX.

Актуальність та проблематика роботи полягає у тому, що з розвитком інформаційних технологій та зі збільшенням об'єму виробництва, на підприємстві виникає необхідність скорочення витрат часу на випуск одиниці виробу.

Запропонована методика дозволяє пришвидшити навчання нового персоналу на ділянці складання та зменшує об'єм необхідної конструкторської документації.

Методика графічної візуалізації процесу складання РЕА розроблена в середовищі САПР верхнього рівня Siemens NX на прикладі блоку живлення.

ЗД-МОДЕЛЬ, ВІЗУАЛІЗАЦІЯ, ДОКУМЕНТАЦІЯ, ТЕХПРОЦЕС,
ЕЛЕКТРОРАДІОЛЕМЕНТИ, МОНТАЖ, СКЛАДАЛЬНИЙ КРЕСЛЕНИК,

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧКИ	7
ВСТУП	8
1 Особливості складання приладів РЕА	10
1.1 Проєктування технологічних процесів складання і монтажу	10
1.2 Принципи монтажу і складання радіоелектронної апаратури	14
1.3 Види монтажу РЕА	19
1.4 Методи складання радіоелектронної апаратури	21
1.5 Монтаж і складання РЕА: типові і групові процеси	23
1.6 Особливості складання і монтажу електричних схем	26
1.7 Складальне креслення при складанні	27
2 Огляд існуючих способів графічної візуалізації складальних процесів ..	29
2.1 Метод графічної візуалізації з застосуванням AR технології	29
2.2 Метод графічної візуалізації з використанням VR технології	36
2.2.1 Проблема помилок при проєктуванні (нових будівель, заводів, складських приміщень) і великі витрати на розробку проєкту	38
2.2.2 Проблема великих витрат на узгодження проєктів на базі натурних прототипів	39
2.2.3 Проблема нестачі практичного досвіду у фахівців і псування ними дорогого устаткування	39
2.2.4 Проблема довгого узгодження проєкту через велику кількість учасників з різних підрозділів і різних міст, що супроводжується великими витратами на відрядження	40
2.3 Метод графічної візуалізації в САПР	42
3 Методика створення графічної візуалізації процесу складання	48

3.1 Послідовність методики створення графічної візуалізації процесу складання.....	48
3.2 Приклад використання методики створення графічної візуалізації процесу складання.....	51
ВИСНОВКИ	58
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	59

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧКИ

AR – augmented reality

VR – virtual reality

БДП – багатошарова друкована плата

ДДП – двошарова друкована плата

ДП – друкована плата

ЕРЕ – електрорадіоелементи

ЄСКД – Єдина система конструкторської документації

ЄСТД – Єдина система технологічної документації

ІС – інтегральна схема

РЕА – радіоелектронна апаратура

ТЕЗ – типові елементи заміни

ТП – технічний процес

ВСТУП

Інноваційні рішення і наукові розробки постійно відкривають перед нами нові можливості, дозволяючи творчо підійти до створення нових динамічних форм бізнесу і трансформації вже існуючих.

Робота на виробництві майже завжди пов'язана з ризиками, взаємодією зі складним або навіть небезпечним обладнанням, ремонтом непередбачених поломок і робочої комунікацією з колегами і підрядниками з різних кінців географії. У цій справі важлива точність і автоматизовані навички, адже від цього залежить безперервність виробничого процесу. Такі вміння розвиваються у людей тільки в процесі практики і тренування з наставниками.

З розвитком інформаційних технологій, кожне передове підприємство піклується про впровадження та забезпечення на виробництві, новітніх методів пришвидшення та автоматизації процесів випуску продукції. Сучасні CAD/CAM/CAE-системи пропонують широкий перелік інструментарію для задоволення цього запиту.

Комплект конструкторської документації містить один з найважливіших документів для виробництва – це складальне креслення виробу. З підвищенням складності виробу в свою чергу ускладнюється складальне креслення та збільшується його об'єм.

Це призводить до збільшення необхідних витрат на:

- збільшення кількості робітників на етапі складання;
- навчання нових кадрів, коли старший робітник вимушений приділяти увагу та час для пояснення особливостей складання того чи іншого приладу.

Графічна візуалізація вирішує низку проблем при організації процесу складання:

- зниження кількості необхідних робітників на один виріб;
- допомагають оптимізувати виробництво
- знижує поріг входу при навчанні нових спеціалістів;
- пришвидшує опанування кожного наступного нового приладу.

Найбільш розповсюдженими з існуючих способів графічної візуалізації складальних процесів є:

- візуалізація з застосуванням AR технології;
- візуалізація з застосуванням VR технології;
- візуалізація в середовищах проектування CAD/CAM/CAE-систем.

1 ОСОБЛИВОСТІ СКЛАДАННЯ ПРИЛАДІВ РЕА

Під словом «складання» в першу чергу потрібно розуміти дії, які спрямовані на створення електричних і механічних з'єднань. Складання радіоелектронної апаратури - це всі технологічні операції механічного з'єднання деталей і електро- та радіоелементів (ЕРЕ) у виробі або його складової частини, які здійснюються в певному порядку. Якщо послідовність дій буде порушена, то не вийде розташувати деталі і забезпечити їх взаємодію так, як рекомендовано проектною документацією.

Технологічний процес складання є заключним етапом виробничого процесу, який включає в себе комплекс робіт зі складання виробів, приладів з вузлів і деталей, та систем з приладів, вузлів і деталей, а також регулювання, налаштування та контроль відповідно до заданих технічних вимог, що значно впливає на їх якість.

Майже всі складальні операції складаються з переходів. В окремому випадку операція може складатися з одного переходу. У створенні переходів лежать технологічні основи. Під переходом розуміють частину операції, яка не може бути роздроблена і виконується без зміни інструменту (пристосувань) одним або декількома робітниками одночасно. Перехід складається з прийомів. Прийомом називається закінчена сукупність простих рухів, які виконуються одним складальником в процесі складання або підготовки до неї.

Розміщення групи деталей в певному положенні в складальному пристрої називається установкою. Процес установки деталей і вузлів в складальному пристрої на конвеєрі включається в операцію як один з її переходів [1].

1.1 Проектування технологічних процесів складання і монтажу

Проектування ТП складання і монтажу РЕА починається з ретельного вивчення на всіх виробничих рівнях вихідних даних, до яких відносяться: короткий опис функціонального призначення виробу, технічні умови і вимоги,

комплект конструкторської документації, програма і планові терміни випуску, керівний технічний, нормативний та довідковий матеріал. До цих даних додаються умови, в яких передбачається виготовляти вироби, нове або діюче підприємство, його місцезнаходження, наявне на ньому обладнання і можливості придбання нового, кооперування з іншими підприємствами, забезпечення матеріалами та комплектуючими виробами. В результаті проведеного аналізу розробляється план технологічної підготовки і запуску виробу.

У розробку ТП складання і монтажу входить наступний комплекс взаємопов'язаних робіт:

- вибір можливого типового або групового ТП і його доопрацювання відповідно до вимог, наведених у вихідних даних;
- складання маршруту одиничного ТП загального складання і встановлення технологічних вимог до конструкції блоків, що входять до неї і складальних одиниць;
- розробка маршрутів одиничних ТП складання блоків (складальних одиниць) і встановлення технологічних вимог до вхідних в них складальних одиниць і деталей;
- визначення необхідного технологічного устаткування, оснащення, засобів механізації та автоматизації;
- моделювання та оптимізація техпроцесу по продуктивності;
- поділ ТП на елементи;
- розрахунок і призначення технологічних режимів, технічне нормування робіт і визначення кваліфікації робітників;
- розробка ТП і вибір засобів контролю, налаштування і регулювання;
- видача технічного завдання на проєктування і виготовлення спеціального технологічного оснащення;
- розрахунок і проєктування потокової лінії, ділянки серійної зборки або гнучкої виробничої системи, складання планувань і розробка операцій переміщення виробів і відходів виробництва;

- вибір і призначення внутрішньоцехових підйомно-транспортних засобів, організація комплектувальної майданчика;
- оформлення технологічної документації на процес відповідно до ЄСТД і її затвердження;
- випуск дослідної партії;
- коригування документації за результатами випробувань дослідної партії.

Розробка технологічного маршруту складання і монтажу РЕА починається з поділу виробу на його частини, на складальні елементи шляхом побудови схем складальної структури і технологічних схем складання. Елементами складально-монтажного виробництва є деталі і складальні одиниці різного ступеня складності. Побудова таких схем дозволяє встановити послідовність складання, взаємний зв'язок між елементами і наочно представити проєкт ТП. Спочатку в компактному вигляді складається схема складальної структури всього виробу, а потім її доповнюють розгорнутими схемами окремих складальних одиниць. Поділ виробу на елементи проводиться незалежно від програми його випуску і характеру ТП складання. Схема складальної структури служить основою для розробки технологічної схеми складання, в якій формується структура операцій складання, встановлюється їх оптимальна послідовність, вносяться вказівки про особливості виконання операцій.

На практиці широко застосовують два типи схем збирання: «віяловий» і з базовою деталлю (рис 1.1). Складальні елементи на схемах складання представляють їх назва, номер за класифікатором ЄСКД, позиційне позначення і кількість. Трудомісткою, та наочною є схема з базовою деталлю, яка відображує часову послідовність процесу складання. За базову деталь приймається шасі, панель, плата або інша деталь, з якої починається складання.

Склад операцій складання визначають виходячи з оптимальної диференціації монтажно-складального виробництва. Вимоги точності, що пред'являються до складання РЕА, в більшості своїй ведуть до необхідності концентрації процесу на основі програмованого механізованого та

автоматизованого обладнання, що знижує похибки збірки при істотному підвищенні продуктивності процесу.

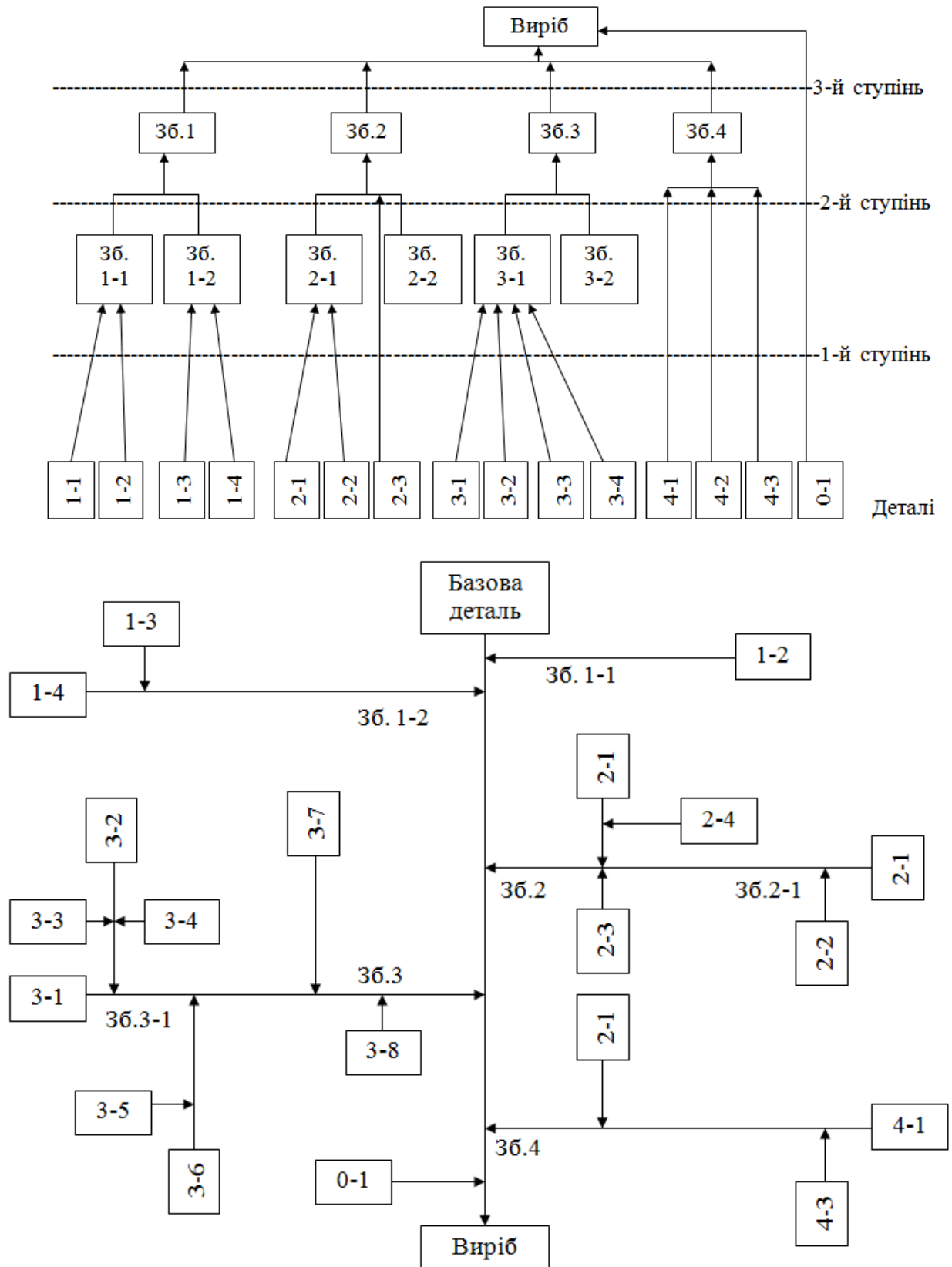


Рисунок 1.1 – Схеми складання виробів

При непоточному виробництві доцільними технологічними межами диференціації є:

- однорідність виконуваних робіт;
- отримання в результаті виконання операції закінченою системи поверхонь деталей або закінченого складального елемента;
- незалежність складання, зберігання і транспортування від інших складальних одиниць;
- можливість використання простого (універсального) або переналагоджуваного технологічного оснащення;
- зручність планування робочих місць і ділянок;
- забезпечення мінімального питомої ваги допоміжного часу в операції;
- встановилися на даному виробництві типових і групових операцій.

У поточному виробництві необхідний рівень диференціації операцій в основному визначається ритмом збірки.

Оптимальна послідовність технологічних операцій залежить від їх змісту, використовуваного обладнання та економічної ефективності. В першу чергу виконуються нерухомі з'єднання, що вимагають значних механічних зусиль. Кожна попередня операція не повинна перешкоджати виконанню наступних. На заключних етапах збираються рухомі частини виробів, роз'ємні з'єднання, встановлюються деталі, які замінюються в процесі настройки.

Розроблена схема складання дозволяє проаналізувати ТП з урахуванням техніко-економічних показників і вибрати оптимальний як з технічної, так і з організаційної точок зору [2].

1.2 Принципи монтажу і складання радіоелектронної апаратури

Для того, щоб визначитися з порядком складання радіоелектронної апаратури та приладів, в першу чергу необхідно вивчити їх конструкцію.

Монтаж - це ТП електричного з'єднання РЕА відповідно до електричної монтажною схемою. Для здійснення монтажу потрібні плати (друковані, провідні), поодинокі провідники, джгути, кабелі.

Технологічні операції завжди виконуються в певному порядку, тому складання РЕА включає в себе монтаж складальних елементів (плат, блоків, панелей, рам, стійок), а також самого приладу. Складання радіоелектронної апаратури здійснюється стаціонарно або рухомо, з концентрацією або диференціацією виконуваних маніпуляцій.

За організаційною формою виконання технологічних процесів складання поділяють на стаціонарну і рухому.

Стаціонарне складання виконується на одному робочому місці, до якого подають всі необхідні деталі або складальні одиниці, і є найбільш поширеною в умовах одиничного або серійного виробництва. Стаціонарне складання можна будувати за принципом концентрації або диференціювання. У першому випадку весь складальний процес виконується одним робітником, у другому - поділяється на попередню, виконувану кількома робочими паралельно, і остаточну, виконувану спеціальною бригадою робітників. Цей вид збирання застосовують в серійному виробництві.

Рухоме складання характеризується тим, що збиране виріб переміщується уздовж робочих місць, за кожним з яких закріплена певна частина складальних робіт. Вона застосовується в серійному і масовому виробництві. Особливістю цієї форми зборки з примусовим рухом виробу, що збирається є його переміщення на складальному конвеєрі з певною швидкістю, суворо узгодженої з ритмом збірки. Остаточне складання радіоелектронних приладів і систем здійснюється в великих складальних цехах з контрольно-випробувальними ділянками.

Відповідно до послідовності, обумовленої поділом виробу на складові частини, розрізняють вузлове і загальне складання.

При вузловому складанні збирають окремі вузли, ТЕЗ, групи деталей, при загальній - збирають і з'єднують деталі, групи і вузли в виріб (блок, прилад, систему), а потім його регулюють, налаштовують і контролюють.

Залежно від характеру робіт розрізняють механічну або електромонтажну збірку.

Механічне складання включає наступні операції:

- слюсарно-припасувальні роботи (обпилювання, гнуття, обробку отворів, нарізування, різьблення і ін.), які виконуються при індивідуальному і дрібносерійному виробництві;
- очистку, обдувку повітрям або промивання деталей перед складанням;
- виконання з'єднань (згвинчування, розвальцювання, заклепування, запресовування, паяння, зварювання, склеювання). При виконанні різьбових з'єднань часто застосовують їх контрування (стопоріння);
- фарбування пошкоджених місць деталей;
- регулювання і контроль складених вузлів для отримання заданих механічних і фізичних характеристик.

Електромонтажна збірка складається з наступних операцій:

- вхідний контроль і підготовка радіокомпонентів до монтажу (обрізка та гнуття їх виводів за формою, що відповідає способу установки компонентів на платах, лудіння виводів та ін.);
- підготовка монтажних проводів і кабелів (зняття ізоляції, лудіння струмопровідної жили, маркування та ін.);
- вхідний контроль і підготовка електромеханічних пристроїв (реле, перемикачів і вимикачів, кнопок, тумблерів, роз'ємів, перехідних колодок, індикаторів та ін.) до монтажу;
- установка радіокомпонентів на друковані плати і пайка монтажних з'єднань;
- установка електромеханічних пристроїв в блоки, прилади та системи;
- розкладка проводів і кабелів в блоках, приладах і системах;
- з'єднання електричних контактів між компонентами, вузлами, електромеханічними пристроями, блоками і приладами пайкою, зварюванням та ін.;

- регулювання та налаштування блоків, приладів і систем для отримання заданих електричних характеристик і параметрів;
- контроль готових блоків, приладів і систем.

Основою складальних робіт є операція - частина технологічного процесу, виконувана над однією або кількома складальними одиницями одним робочим (або групою) у безперервний спосіб на одному робочому місці. Технологічні процеси можуть бути концентрованими і диференційованими.

Концентрований процес складання характерний для одиничного і дрібносерійного виробництва, коли всі операції вузлового і загального складання виконують на небагатьох робочих місцях (або одному робочому місці) кілька складальників (або один складальник). Якщо виріб включає типові складальні елементи, вузлове складання диференціюється, а загальне - ведеться концентровано.

Переваги:

- підвищує якість складання;
- полегшує процес нормування.

Недоліками концентрованого складання є:

- тривалість календарного циклу через послідовного виконання операцій;
- неможливість відокремлення окремих робіт, які не потребують залучення для їх виконання складальника вищої кваліфікації;
- труднощі механізації і автоматизації нерозчленованих операцій.

Диференційоване складання радіоелектронної апаратури виконується за принципом поділу всіх необхідних маніпуляцій на кілька простіших. Такий підхід призводить до механізації та автоматизації виконуваних операцій, для контролю яких не потрібні фахівці високої кваліфікації.

Диференційоване складання радіоелектронної апаратури підходить для серійного і масового виробництва. Важливо не допускати дроблення всіх необхідних дій на надмірно дрібні операції, щоб не витрачати зайві ресурси на перевезення, створення нових виробничих площ, а також щоб уникнути

підвищеної стомлюваності робітників при виконанні повторюваних дій. Для кожного випадку необхідно розраховувати техніко-економічні показники, від яких буде залежати прийняття рішення про необхідність диференціації складальних і монтажних робіт.

Паралельність складання радіоелектронної апаратури передбачає одночасний монтаж кількох елементів виробу, що призводить до скорочення термінів здачі готової продукції. Технологічно найбільш ефективно діяти за принципом паралельності таким чином:

- виробляти і збирати відразу кілька виробів РЕА на багатопредметних конвеєрах;
- об'єднати на автоматизованих конвеєрах виробництво деталей для РЕА та їх складання.

Прямоточність складання радіоелектронної апаратури передбачає створення готового продукту з мінімальними витратами часу на проходження всіх необхідних фаз і операцій від самого початку процесу до виходу готового продукту. У разі відхилення від принципу точності, збірка виробу ускладниться, займе більше часу. Дотримання принципів точності і безперервності необхідно у всіх підрозділах підприємства.

Принцип безперервності складання радіоелектронної апаратури передбачає виключення або максимальне зниження тривалості всіх простоїв, що утворюються між або всередині операцій. Для його дотримання необхідно обґрунтовано підходити до вибору технологічних процесів, об'єднувати операції виготовлення деталей для РЕА та їх складання, контролювати і регулювати всі етапи.

Принцип пропорційності складання радіоелектронної апаратури передбачає дотримання рівномірності продуктивності праці за одиницю часу на кожному з робочих місць, ліній, ділянок, цехів. Якщо дотримуватися цього принципу, то це дозволить максимально повно використовувати виробничі потужності та площі, здійснювати рівномірний випуск продукції. Для спрощення дотримання цього принципу є сенс ділити вироби на елементи і уніфікувати їх.

Принцип ритмічності складання радіоелектронної апаратури полягає у виробництві однакової або зростаючої кількості виробів за певний час. Ритмічність підвищується при застосуванні типових і групових процесів, їх уніфікації та синхронізації операцій [3].

1.3 Види монтажу РЕА

Технологічний процес складання виробу повинен відповідати технічним і економічним вимогам.

Технічні вимоги пов'язані з цільовим призначенням виробу, його надійністю і точністю. Економічні вимоги передбачають мінімальні витрати праці та витрат виробництва. З можливих варіантів технологічного процесу складання, що забезпечують виконання технічних вимог, повинен бути обраний найбільш економічний для заданих умов виробництва варіант.

Монтаж електро- і радіокомпонентів, супроводжуваний з'єднанням електричних кіл або включенням в них зазначених виробів, в загальному комплексі складально-монтажних робіт є найбільш трудомістким. В даний час існує декілька способів з'єднання електро- та радіокомпонентів і електротехнічних виробів провідниками: об'ємно-джгутовий і друкований.

При об'ємно-джгутовому монтажі дроти, які йдуть паралельно пов'язують і укладають в певному порядку. Причому сам джгут виготовляють окремо від виробу, що збирається, а потім його прокладають, закріплюючи у виробі, і паяють. Застосування джгутів надає системі монтажних проводів високу механічну міцність і вібростійкість. Основний недолік даного способу монтажу - значна витрата проводу і підвищена власна ємність.

Найбільш широко поширений друкований монтаж, при якому для з'єднання електро- та радіокомпонентів використовують друковані провідники - тонкі смужки мідної фольги, витравлені на діелектричному підкладці (друкованої плати). Усі електро- та радіокомпоненти, що входять в монтажну схему електронного вузла, встановлюють на платі і з'єднують з друкованими

провідниками пайкою. Застосування друкованого монтажу в електронних вузлах, блоках, приладах і системах забезпечує заміну значної частини ручних монтажних операцій механізованими, допускають використання напівавтоматичних і автоматичних установок і поточних ліній. При друкованому монтажі всі електромонтажні з'єднання, наявні на одній стороні плати, можна здійснювати механізованої або автоматизованої груповий пайкою. В результаті цього значно зменшується обсяг контрольно-випробувальних операцій.

Друкований монтаж підвищує надійність радіоелектронних систем і приладів, забезпечує їх ідентичність. Застосування двосторонніх друкованих плат (ДДП) дозволяє уніфікувати конструкції всіх вузлів, блоків і приладів, що складають радіоелектронні системи.

Розвиток мікромініатюризації значною мірою залежить від застосування друкованих плат, особливо багат шарових (БДП).

Застосування БДП дозволяє: комутувати компоненти мікромініатюрних радіоелектронних вузлів і блоків з гібридними і напівпровідниковими інтегральними мікросхемами; підвищувати щільність друкованого монтажу; спростувати складання вузлів і розширювати їх функціональні можливості.

В даний час при складанні радіоелектронних вузлів, блоків і приладів, що складають радіоелектронну систему, в основному використовують друкований монтаж, а при складанні самої системи - об'ємно-джгутовий.

Монтажно-складальні роботи у виробництві блоків, приладів і систем мають свої особливості в порівнянні із складанням і монтажем інших видів електричних приладів. Це, по-перше, різноманіття електро- та радіокомпонентів, напівпровідникових елементів, проводів, специфічних деталей і вузлів, з яких збираються блоки, прилади і системи, і велика кількість підготовчих операцій (гнуття, обрізка і лудіння висновків у навісних електро- та радіокомпонентів, оброблення проводів і кабелів, в'язка джгутів і т. п.), по-друге, широке використання контрольно-вимірювальної та випробувальної апаратури.

Дуже важливо організувати надійний контроль якості електро- та радіокомпонентів, які надходять на складання, а також операцій складання,

монтажу та регулювання апаратури. Під випробуванням РЕА розуміють перевірку її відповідності технічним вимогам. Випробування включають: контроль параметрів РЕА та її елементів при різних умовах експлуатації і з плином часу; перевірку надійності роботи РЕА при впливі зовнішніх факторів (кліматичних, механічних і електричних).

Трудомісткість контрольно-випробувальних робіт велика, і її скорочення є одним з важливих шляхів зниження собівартості готової РЕА. Зниження трудомісткості цих робіт здійснюється за рахунок їх автоматизації та механізації.

Залежно від точності виготовлення деталей і складальних одиниць, на які поділяються електромеханічні прилади, збірка їх може бути здійснена різними методами [3].

1.4 Методи складання радіоелектронної апаратури

Спосіб отримання заданої точності вихідних параметрів виробу в процесі складання за певних вимог взаємозамінності називається методом складання.

Розрізняють такі методи складання: повної та неповної взаємозамінності, попереднього підбору, регулювання, припасування по місцю і попарного підбору.

При виборі методу складання насамперед керуються вимогами взаємозамінності, беручи до уваги конструктивні особливості і точність приладів, серійність випуску, прийняту організаційну форму збірки, економічну доцільність.

Складання методом повної взаємозамінності проводиться без додаткової обробки або підбору деталей, що збираються за умови, що всі деталі виготовлені із заданою точністю, що забезпечує повну взаємозамінність (сума допусків всіх складових ланок не повинна перевищувати допуску замикаючої ланки). При цьому методі необхідні точні пристрої і контрольно-вимірювальна апаратура.

При забезпеченні повної взаємозамінності деталей, процес складання спрощується і може виконуватися робітником нижчої кваліфікації. Час виконання окремих складальних операцій стає постійним, що створює умови для організації

поточного виробництва з певним ритмом і для автоматизації процесу складання. Цей метод складання найбільш продуктивний і тому набув найбільшого поширення в серійному і масовому виробництві приладів.

Складання методом неповної взаємозамінності проводиться, як правило, при великій кількості зібраних деталей і складальних одиниць, коли через збільшення числа складових ланок недоцільно застосовувати метод повної взаємозамінності, так як зменшується допуск на кожен ланку і відповідно зростають виробничі витрати на його виготовлення. У цьому випадку ймовірність збігу ланок з несприятливим поєднанням граничних розмірів в одній складальній одиниці зменшується.

Складання виробу методом неповної взаємозамінності здійснюється підбором або припасуванням одного або декількох складальних елементів і застосовується в дрібносерійному і серійному виробництві.

Складання методом попереднього відбір полягає в індивідуальному відборі деталей і складальних одиниць (попарно або групою), щоб забезпечити необхідний розмір останнього у ланки розмірної ланцюга.

Попарний відбір полягає в тому, що до основної деталі підбирається сполучається деталь, що забезпечує необхідний розмір останнього у ланки. Груповий відбір проводиться з попередньою розбивкою деталей, на кілька груп так, щоб будь-яка пара з відповідних груп збиралася без припасування або попарного відбору.

Метод попереднього відбору економічно виправдовується при серійному або масовому виробництві виробів (складальних одиниць), що включають не більше трьох елементів. Основний недолік цього методу - низька ступінь взаємозамінності, обмежена межами однієї розмірної групи.

Складання методом регулювання проводиться в тому випадку, коли встановлена точність замикаючої ланки досягається включенням до розмірного ланцюг додаткових ланок, що компенсують надлишкову похибка. Цей метод рекомендується для складання складних виробів, що мають велику кількість складальних елементів.

Введені в розмірний ланцюг додаткові ланки, що компенсують надлишкову похибку, називаються компенсаторами. За принципом компенсації похибки компенсатори поділяють на нерухомі з постійним розміром (прокладки, шайби і т. д.) і рухливі - зі змінним розміром (різьбові деталі, пружини, клини і т. д.).

Складання методом припасування по місцю полягає в додатковій обробці деталей і складальних одиниць при складанні, тобто встановлена точність замикаючої ланки досягається зменшенням розміру одного зі складових ланок на величину надлишкової похибки зняттям стружки. Великий обсяг ручних робіт (в тому числі і слюсарних) визначає використання цього методу в одиничному виробництві.

Складання методом підбору за місцем полягає в тому, що встановлена точність замикаючої ланки досягається індивідуальним підбором одного або декількох складових ланок, дійсні розміри яких дозволяють компенсувати отриману похибку. Цей метод має низьку ступінь взаємозамінності і може бути використаний в умовах дрібносерійного виробництва. Причому складання повинно виконуватися висококваліфікованими робітниками, що мають практичний досвід виконання складних і точних робіт [3].

1.5 Монтаж і складання РЕА: типові і групові процеси

Для оперативної організації виробництва нової РЕА, що відповідає всім сучасним параметрам якості, на підприємстві повинна постійно вдосконалюватися технологічна підготовка монтажно-складального виробництва. Для цього необхідно уніфікувати застосовує під час складання техпроцеси і елементи конструкції. Уніфікація технологічного процесу включає в себе типізацію і групові методи монтажу і складання.

Типовий ТП - це схема процесу монтажу і складання виробів одного класу. У нього входять спосіб установки основного елемента і розташування інших, перелік всіх необхідних дій, типи технологічного оснащення, розпорядок роботи,

наближена трудомісткість для необхідного обсягу виробництва. Типовий процес дозволяє досить легко планувати процес складання РЕА, який потім вводиться в програму ЕОМ.

Раніше групування складальних блоків і одиниць визначалося схожістю їх конструкції (габарити, кількість точок з'єднання, схема базування) і технології (маршрут складання, зміст переходів, оснащення). Типізація включає в себе клас, вид, підвид, тип.

Клас – це елементи зі схожим видом з'єднання при складанні РЕА: пайка, зварювання, склеювання.

Вид – це деталі зі схожим рівнем механізації збирання радіоелектронної апаратури: ручне складання, а також із застосуванням механізованого інструменту, автоматизоване. Види діляться на підвиди, залежно від конструктивних елементів розрізняють клейове з'єднання внапусток, з накладками, стикове і кутове.

Типи – це складальні одиниці з максимально схожими умовами зборки, настроями і кількостями точок кріплення.

Методи типізації техпроцесу поділяють на прості (одна операція), умовно прості (один ТП), комплексні.

Прості – це методи прямої типізації без попередньої уніфікації складових частин, схожі за рівнем технологічного обладнання.

Умовно прості - це такі методи типізації, які пов'язані з прийомами монтажу ЕРЕ і деталей, із застосуванням одних і тих же технологічних рішень для різних класів елементів збірки, створення різних технологічних маршрутів з переліку налагоджених операцій.

Розробка ТП складання і монтажу нового виробу при типізації полягає у відборі відповідного цьому виробу класифікаційного типу і виборі потрібної кількості типових операцій з тих, що є в наявності. При цьому може виникнути потреба в розробці абсолютно нових операцій типового ТП.

Групові методи складання і монтажу необхідні для складальних одиниць з однаковими умовами зборки і використанням однакових засобів механізації та

автоматизації. Групи виділяються відповідно до габаритів базової деталі і інших елементів, які використовуються для складання і монтажу, видами з'єднань, необхідною точністю, способами виконання цих сполук, характеристиками використовуваних потужностей, оснащенням і контрольною апаратурою. У свою чергу, складальні одиниці розбиваються на групи:

- з повним монтажем на одному обладнанні;
- з незакінченим монтажем - коли частина деталей і ЕРЕ збираються на одній груповій операції, а на інших - деталі і ЕРЕ відносять до інших груп або їх збирання відбувається за одиничного процесу;
- з одним загальним груповим технологічним маршрутом, в який входить набір групових технологічних операцій, для кожного з яких характерні відповідні пристосування і налагодження, що допускають після невеликої перебудови складання наступної партії виробів РЕА

Комплексні методи використовують нормалізацію елементів робочого процесу з додатковою нормалізацією ЕРЕ і деталей (рис 1.2) [2].

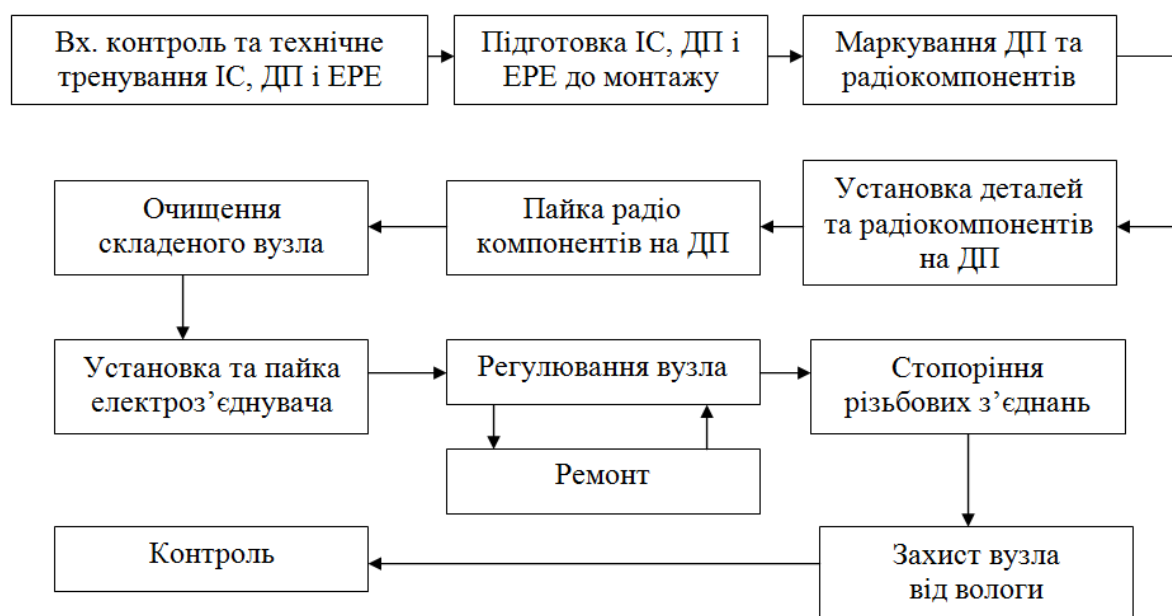


Рисунок 1.2 – Комплексна система типового ТП складання вузла РЕА на ДП

1.6 Особливості складання і монтажу електричних схем

У багатьох схемах застосовуються мікропотужні мікросхеми, виготовлені за КМОП технології (серії 561, 1561, 564), а також польові транзистори. Всі ці деталі, поки вони не встановлені в плату, піддаються впливу статичної електрики. На людину вона утворюється через тертя одягу і може перевищувати потенціал 1000 В. Тому до дотику до цих деталей необхідно надіти заземлений браслет або хоча б торкнутися рукою металу батареї опалення. Деталі, що піддаються впливу статичної електрики, повинні зберігатися в металевій фользі або в спеціальних коробках. Для захисту польових транзисторів виводи у них можна обмотати оголеним проводом, який знімається при монтажі. Монтаж цих деталей на плату краще виконувати в останню чергу, після установки всіх інших деталей.

Складання друкованої плати починають з установки елементів, що вимагають механічного кріплення. При цьому доводиться іноді розширювати отвори і пази, а робити це з вже встановленими деталями незручно.

Всі встановлювані деталі не повинні мати на корпусі подряпин, тріщин, вм'ятин або якихось інших механічних пошкоджень. Навіть якщо такі деталі і працюють, то це не означає, що це триватиме довго. Деталі встановлюються так, щоб вони не торкалися одна одної.

Паяльник краще використовувати з заземлюючим жалом, а температура жала повинна бути приблизно 270 °С. Якщо вона значно вище, то припої на жалі швидко вигорають і набувають сірого кольору, а при нормальній температурі розплавлені припої не втрачають дзеркального блиску, який залишається і після його охолодження. Така пайка забезпечує якісне електричне з'єднання.

Для прискорення пайки використовують рідкий спирто-каніфольний флюс. Він руйнує окисну плівку на поверхні висновків деталей. Флюс легко можна зробити самостійно, розчинивши шматок каніфолі в спирті в пропорції приблизно 1:10.

Під час пайки елементів, щоб їх не перегрівати, паяльником з припоєм на жалі торкаються виводів не більше ніж протягом 3 секунд. Самі елементи при

цьому зручно притримувати пінцетом. Для кращої пайки виводи деталей корисно до установки на плату попередньо облудити. При установці елементів їх виводи загинаються так, щоб було видне маркування.

Деякі деталі (діоди, стабілітрони, електролітичні конденсатори та ін.) мають полярність, її необхідно дотримуватися при монтажі.

При неправильному підключенні полярності у конденсатора витік буде в 10-100 разів більше в порівнянні з правильною. Вольтметр для цих вимірювань необхідний з великим входним опором.

Після закінчення пайки виступаючі виводи деталей укорочують і розчинником змивають залишки каніфолі, що дозволить проконтролювати якість монтажу. На платі не повинно залишитися крапель припою і замикань між друкованими доріжками [4].

1.7 Складальне креслення при складанні

Складальне креслення - документ, який містить зображення складальної одиниці та інші дані, потрібні для її складання (виготовлення) і контролю. У конструкторських бюро за складальними кресленнями виконують робочі креслення деталей, а далі технічні відділи підприємств використовують їх для підготовки виробництва, розробки технологічної документації, контролю і приймання готових виробів.

За призначенням складальне креслення повинно містити:

- зображення складальної одиниці, яке дає уявлення про розміщення і взаємозв'язок складових частин, забезпечує можливість здійснення складання та контролю складальної одиниці; при потребі на складальних кресленнях має бути додаткова схема з'єднання і розміщення складових частин виробу;
- розміри з їхніми граничними відхиленнями та інші параметри і вимоги, які мають бути виконані чи проконтрольовані заданим складальним кресленням;
- вказівки про характер спряження і методи його виконання, якщо точність спряження забезпечується в процесі складання виробу не заданими граничними відхиленнями, а підбиранням та пригінкою деталей тощо;

2 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СПОСОБІВ ГРАФІЧНОЇ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ СКЛАДАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ

У галузі виробництва РЕА широко розповсюджені різного ступеню інтеграції наступні способи графічної візуалізації, такі як AR, VR та САПР.

AR (доповнена реальність) показує довідки, інструкції, анімації, використовуючи реальні предмети навколо людини. Камера пристрою захоплює зображення, а технологія розпізнає його і виводить на екран відповідну інформацію.

VR (віртуальна реальність) пропонує повністю спроектовану модель. Технологія не вимагає наявності камери. Об'єкти змодельовані дизайнерами - як відеогра [6].

САПР – автоматизована система, призначена для автоматизації технологічного процесу проектування виробу, результатом якого є комплект проектно-конструкторської документації, достатньої для виготовлення та подальшої експлуатації об'єкта проектування [7].

2.1 Метод графічної візуалізації з застосуванням AR технології

Застосування AR-технологій має широкі можливості не тільки на стадіях проекту і складання, а й в процесі експлуатації. AR пропонує більш мобільне управління інформацією, яка крім обробки цифрових даних, передбачає введення та роботу з інформацією з реального простору і часу.

Так, одним із прикладів застосування AR пристрою може бути складання апаратури або ремонт його частин. Окуляри HoloLens сканують серійний номер і виводять керівництво щодо його експлуатації перед користувачем, а також фотографії і відео, які можуть знадобитися при складанні. Також можна залишити коментарі командам складальників наступної зміни.

Можливі сценарії застосування AR:

- найбільш поширеним є завчасна оцінка реалізації технічних рішень до моменту прийняття їх в роботу. Перш за все, застосування AR буде актуально як для виробництва нової РЕА, так і модернізації та ремонту;
- у момент застосування технології AR передбачається використання масштабу 1:1, як наслідок, окуляри додаткової реальності - це ідеальний інструмент для служби приймання, зокрема головного конструктора і всіх провідних фахівців, як з боку виробника, так і зі боку замовника;
- окуляри MS HoloLens (рис. 2.1) дозволяють не тільки переглядати технічні параметри кожного елемента 3D-моделі, а також проводити відео- та фотозйомку окремих суперечливих моментів для подальшого детального розгляду.



Рисунок 2.1 – Використання окулярів MS HoloLens при складанні

Отже, існуючі AR-рішення можуть бути використані як один з інструментів для автоматизації процесів і підвищення продуктивності, допомагають контролювати технічні ризики, сприяють скороченню браку

продукції, підвищують ефективність логістичних процесів і покращують забезпечення безпеки праці [8].

Співробітники підрядника NASA використовують окуляри-гарнітуру доповненої реальності Microsoft AR HoloLens для швидкого і правильного складання елементів космічного апарату Orion.

Інженери американської аерокосмічної компанії Lockheed Martin (головний підрядник NASA, який займається будівництвом космічного корабля Orion, призначеного для транспортування людей до Місяця або Марса і доставки їх назад на Землю) використовують у допоміжних цілях при монтажі окуляри доповненої реальності Microsoft HoloLens при складанні елементів капсули кабіни екіпажу, що значно економить час, так як немає необхідності в читанні тисячі сторінок паперових інструкцій для підготовки і в процесі виконання робіт.

Традиційно, в великих аерокосмічних організаціях існують правила ознайомлення з тисячами сторінок паперових інструкцій для своїх працівників. В останні роки такі компанії, як Boeing і Airbus почали проводити експерименти з використанням обладнання для доповненої реальності, але такі складні процеси впровадження нових технологій рідко виходять за рамки етапів тестування.

У компанії Lockheed Martin ця парадигма змінюється. Інженерний персонал тепер щодня використовує обладнання доповненої реальності для виконання своїх поточних робочих обов'язків.

Технічний фахівець зі збирання космічного корабля кожен день використовує можливості гарнітури Microsoft HoloLens для своєї роботи з капсулою апарату Orion. При виконанні процесу безпосереднього свердління він знімає пристрій і працює з інструментами по-старому тільки руками і очима.

Тому команда монтажників використовує гарнітуру доповненої реальності для вивчення обсягів наступного завдання або перевірки правильності виконаних дій, причому обсяг подачі інформації в пристрої обмежений і розбитий на п'ятнадцятихвилинні монтажні інтервали, що більш розумно, ніж постійне невпинне отримання інструкцій.

За допомогою гарнітури доповненої реальності фахівці можуть бачити голографічні моделі компонування елементів космічного корабля (рис. 2.2), які створені для інженерного проєктування за допомогою спеціального програмного продукту Score AR. Віртуальні моделі деталей і схеми маркування візуально накладаються на вже зібрані частини конструкції.

Необхідна інформація, наприклад, інструкції щодо моментів затяжки потрібних з'єднань, відображаються прямо над отворами, до яких вони належать, тому фахівець відразу може побачити, як повинен виглядати готовий елемент після складання.

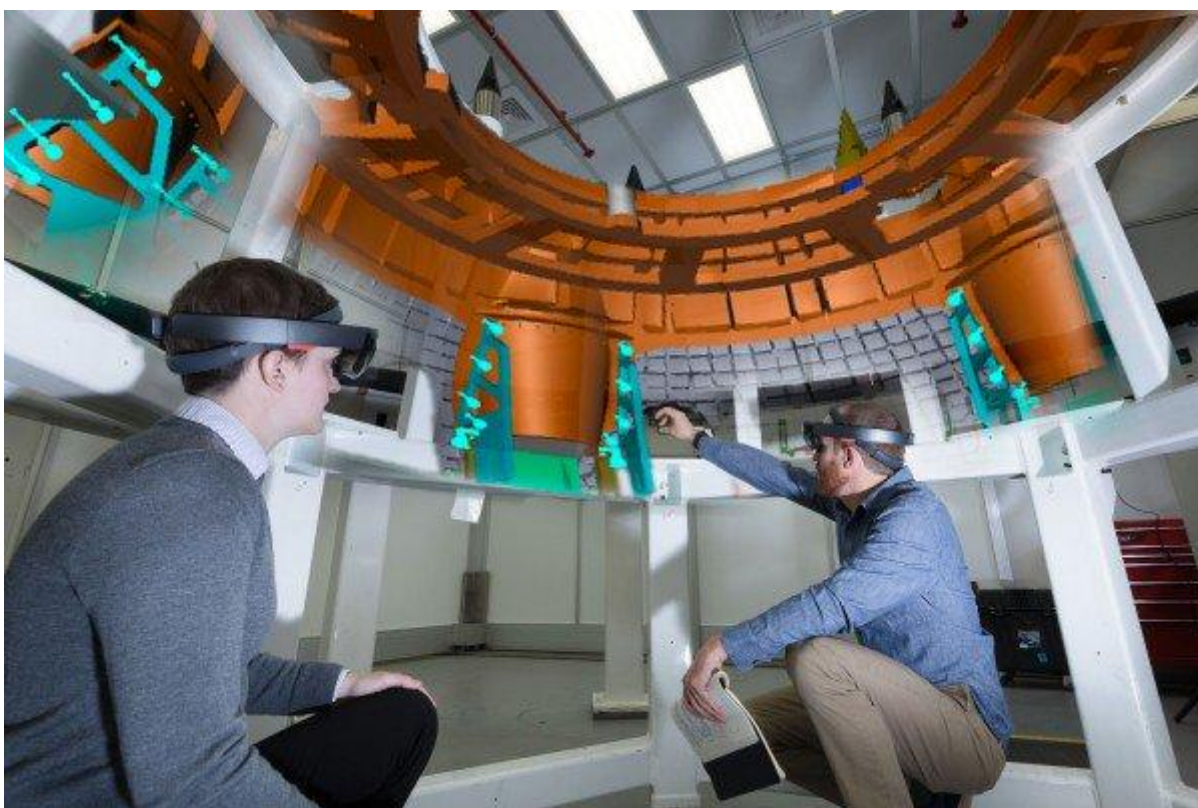


Рисунок 2.2 - Голографічні моделі компонування при складанні

Віртуальні елементи моделей навколо фахівців за допомогою ПЗ Score AR так само представлені в різних кольорах, згідно монтажного плану виконання робіт, щоб було видно, який саме працівник відповідає за складання певного вузла.

Для команди, яка монтує каркас теплозахисного екрану корабля Orion, це абсолютно нова технологія допомоги в монтажі, яка дозволяє замінити вивчення

тисячі п'ятисот сторінок паперових інструкцій зі збірки та проведення монтажних робіт.

При використанні гарнітур доповненої реальності фахівцям потрібно набагато менше часу для ознайомлення і підготовки до виконання нових завдань, також зменшився час на виконання самих дій, як простих, так і складних.

Голова відділу нових технологій компанії Lockheed Martin заявляє, що на основі нового дослідження, отриманого його фахівцями при використанні гарнітур доповненої реальності в земних умовах, можна зробити висновки про те, як доповнена реальність зможе допомогти астронавтам обслуговувати і ремонтувати складні космічні об'єкти в космосі.

Компанія хоче, щоб астронавти мали повноцінну можливість технічного обслуговування обладнання, які б були набагато інтуїтивно зрозумілі і ефективні, ніж роздруківки інструкцій або комплекти креслень.

На даний момент гарнітури доповненої реальності потребують доопрацювань, необхідно поліпшити їх зносостійкість і спростити варіанти їх використання, перш ніж можна буде застосовувати їх в космосі. Так само створення контенту для фахівців вимагає великих зусиль і часу для розробки, але вже з великим обсягом виконаної роботи далі масштабувати такі системи і опрацьовувати нові дані стає простіше (рис. 2.3) [9].

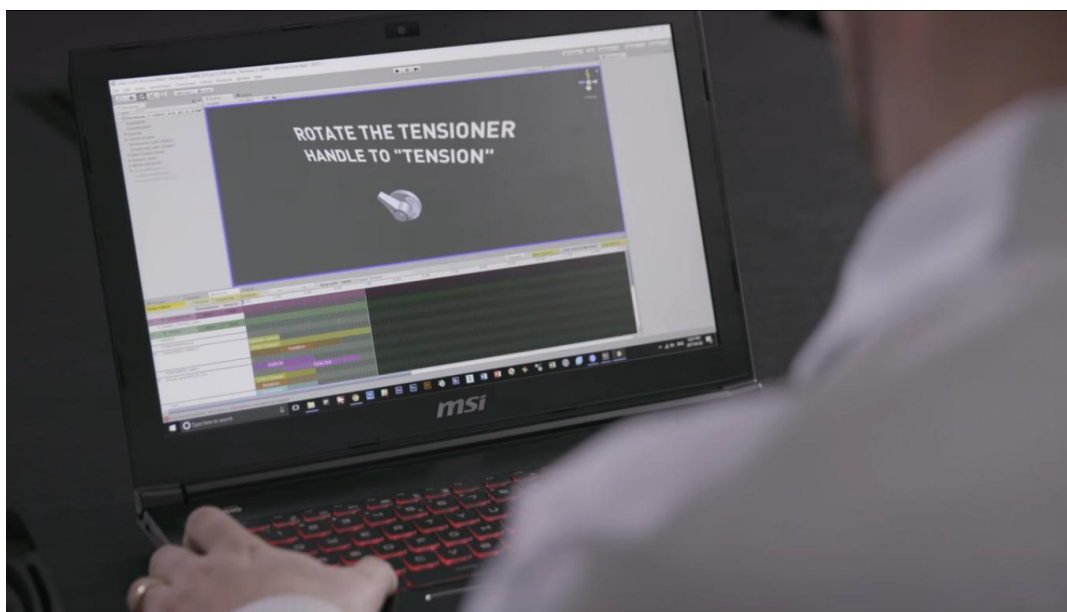


Рисунок 2.3 – Створення фахівцем інструкцій зі складання

Переваги застосування AR візуалізації:

- допомагає уникнути помилок під час проєктування. Розробка нового обладнання - процес трудомісткий і витратний. Недоліки, які закралися на цьому етапі, можуть дорого обійтися, а на їх усунення знадобиться багато часу. Доповнена реальність заощаджує кошти і ресурси за рахунок роботи з віртуальними прототипами майбутньої моделі. За допомогою планшетів або через спеціальні окуляри фахівці бачать креслення як об'ємні проєкції. Можна навіть влаштувати віртуальний тест конструкції. Це допомагає оцінити ергономіку продукту і виявити недоліки, які не видно на етапі проєктування;

- прискорює складання продукції. У фахівців технологічних компаній багато часу йде на розшифровку інструкцій. Компанії шукають, як прискорити складання механізмів і гарантувати якість виконаних робіт. AR дозволяє витрачати менше зусиль і отримувати готові вироби швидше. Доповнена реальність повністю замінює паперові роздруківки. Кожен об'єкт в поле зору спеціального пристрою супроводжується докладною довідкою про його використанні;

- спрощує ремонт і утримання виробництва. Виробничі приміщення вимагають постійного обслуговування і своєчасного ремонту. Нехтування в цьому питанні може обернутися простоем і втратою запланованих доходів.

Доповнена реальність - це зручний для бізнесу інструмент вирішення подібних проблем. AR дозволяє побачити інфраструктуру будівель, приховану від очей всередині стін. Датчики передають інформацію про працездатність системи, а інтерактивні схеми дозволяють встановити точне розташування пошкодженої ділянки. Майстру не доведеться витрачати час на пошук проблемних місць, а ремонт буде точковим і максимально ефективним. Працюючи з AR, майстер отримує підказки про характер проблеми і способі її усунення;

- виводить післяпродажне обслуговування на новий рівень. Боротьба за клієнта не закінчується відразу після продажу. Виробники надають гарантії на продукцію, ремонтують по гарантії і без неї, дають знижки на нові покупки. Для

покупця зручні та вигідні умови сервісного обслуговування - один з критеріїв вибору компанії.

За допомогою AR можна створити екосистему, до якої будуть підключені клієнтські сервіси та ремонтні майстерні компанії. Кожна деталь при випуску позначається спеціальним кодом. Він зчитується пристроями доповненої реальності і передає всю інформацію про обладнання та його використання. В результаті скорочується час на діагностування і усунення проблеми, мінімізується людський фактор - майстер отримує від AR-помічника рекомендації щодо подальших дій;

- заощаджує на логістиці. На складах з сотнями найменувань продукції збірка вантажу займає багато часу. Також впливає людський фактор - чим більше участі людей, тим вище ймовірність помилки. Доповнена реальність може оптимізувати логістику. Це працює за принципом спливаючих підказок: AR-пристрій зчитує спеціальний код і видає персоналу потрібні інструкції;

- навчає персонал швидше і ефективніше людей. На складних виробництвах навіть висококваліфікований персонал доводиться навчати. Це забирає час, який співробітник міг витратити на роботу. Доповнена реальність дозволяє навчатися в процесі. Система підказок краще особистого наставника впорається з цим завданням [6].

Недоліки застосування AR візуалізації:

- на даний момент максимальний час комфортного носіння гарнітури складає близько трьох годин, потім вона стає за відчуттями не дуже зручною для очей і важкуватою для шиї і голови, що приводить до стомлюваності;
- маленький кут огляду;
- висока вартість носимих пристроїв, пряма залежність між продуктивністю і вартістю;
- похибки з точки зору наукової точності при перенесенні реальних об'єктів і явищ в віртуальний світ;
- технічні обмеження;
- висока вартість спеціалізованого контенту.

Для використання VR технології обладнання повинно відповідати наступним мінімальним вимогам:

- CPU: Intel i5-4590 / AMD Ryzen 5 1500X;
- RAM: 8 GB;
- VIDEO CARD: Nvidia GTX 960/1050, AMD Radeon RX 460 (2 GB);

2.2 Метод графічної візуалізації з використанням VR технології

Інтерес до технології віртуальної реальності під час пандемії COVID-19 виріс, причому не тільки з боку великих промислових корпорацій, де простій в роботі коштує великих грошей, але і з боку рітейлерів, дизайн-бюро і навіть держустанов. В першу чергу, це обумовлено потребою підтримувати бізнес-комунікації дистанційно. До конференцій в Zoom і Skype додалися наради в віртуальних кабінетах і лекторіях. Технологія активно розвивається: якщо ще 20 років тому вона була доступна тільки світовим корпораціям типу Boeing і Lockheed Martin.

Актуальність застосування VR в промисловості полягає в першу чергу, в тому, що це дозволяє знизити помилки в проєктуванні і прискорити узгодження складного технічного проєкту. Обговорювати проєкт в масштабі 1:1 з усіма учасниками процесу наочніше, ніж використовувати креслення, зменшені копії (макети) або дивитися 3D-модель на «плоскому» екрані.

У другу чергу, застосування VR є ефективним для тестування ергономіки та навчання персоналу. Віртуальна реальність дозволяє ефективно навчати співробітників взаємодії з клієнтами та колегами, відточувати бізнес-процеси, вивчати роботу складного обладнання. Технології віртуальної реальності дають практично безмежні можливості щодо створення навчальних курсів різного рівня складності, тестування і моніторингу процесу навчання. Для створення навчального курсу підходять більшість моделей недорогих окулярів віртуальної реальності, тому найбільш витратною частиною курсу стає його створення.

Основна перевага VR в навчанні - рівень занурення в ситуацію. Людський мозок швидко забуває, що він знаходиться в додатку і людина починає вести себе

абсолютно природньо. Кожен урок записується і зберігається. Навчальні програми можуть бути різного рівня складності і включати в себе режими тестування, відпрацювання помилок, онлайн навчання з інструктором. Будь-які освітні курси легко змінюються не тільки візуально, але і структурно. Швидка заміна діалогів, інтер'єрів, персонажів дозволяє ефективно допрацьовувати процес навчання. Непотрібно буде створювати кожен курс з нуля, досить просто внести зміни в поточний. Кожен новий освітній курс стає дешевшим завдяки попереднім напрацюванням [10].

Створюючи новий продукт, компанія повинна бути впевнена, що його буде зручно експлуатувати і обслуговувати. Використання системи віртуальної реальності разом із системами зворотного тактильного зв'язку дозволяє скоротити витрати і час на створення натурних прототипів.

У 1999 р. концерн Ford відзвітував про те, що застосування систем віртуального проєктування забезпечило \$ 40 млн економії на інженерних витратах і більш \$ 1 млрд - завдяки змінам, пов'язаним з виробничим циклом.

З появою шоломів Oculus Rift і HTC VIVE спектр вирішуваних завдань суттєво розширився. Так само, як і кількість компаній, які могли дозволити собі цю технологію [9].

VR-технології вже зараз відіграють велику роль в оцифруванні виробничої промисловості, перетворюючи важкі інжинірингові процеси в зручні, наочні і вигідні.

Одним з основних завдань галузі є проєктування виробів при одночасній економії часу і грошових коштів. У зв'язку з цим, рішення, пов'язане з віртуальною реальністю, полягає в поліпшенні якості розгляду проєктів, що дозволяє виправляти проєктні помилки на ранніх стадіях.

Показовим прикладом переваги VR є управління великими проєктами багатосерійного виробництва. В цьому випадку дуже важливий якісний аналіз стану проєкту на кожному етапі його реалізації. Необхідно переконатися у відповідності проєкту технічним вимогам і стандартам, правильності виконання операцій з технічного обслуговування, а також ергономіки окремих об'єктів в

умовах, наданих замовником. Все це є ключовими завданнями проєкту, які тепер можуть бути легко вирішені завдяки віртуальній реальності [7].

Для використання VR технології обладнання повинно відповідати наступним мінімальним вимогам:

- CPU: Intel i5-4590 / AMD Ryzen 5 1500X;
- RAM: 8 GB;
- OS: Windows 10;
- VIDEO CARD: NVIDIA GeForce GTX 970 / AMD Radeon 400 Series;
- DEDICATED VIDEO RAM: 3 GB;

2.2.1 Проблема помилок при проєктуванні (нових будівель, заводів, складських приміщень) і великі витрати на розробку проєкту

Завантажуючи 3D-модель проєктованої будівлі / приміщення в VR, проєктувальник може побачити проєкт в масштабі 1:1 (рис. 2.4) і краще оцінити якість проєктування, а також ергономічні характеристики об'єкта, що неможливо зробити, розглядаючи 3D-модель на екрані монітора.



Рисунок 2.4 – Відображення проєкту в масштабі 1:1

Разом з фахівцями з відділів логістики і безпеки вони можуть узгодити розташування обладнання в приміщенні, організацію виробничих потужностей і протестувати сценарії роботи і відповідність вимогам безпеки до введення будівлі в експлуатацію.

Приклад: Safran Nacelles, менше, ніж за рік зекономила 300 000 € за рахунок інвестиції в систему VR. Французька компанія стала розробляти свою нову продукцію всього за 42 місяці, а раніше цей процес тривав 60 місяців. Safran Nacelles також змогла закінчити проєкт на 8 місяців раніше, а тривалість проєкту передбачалася близько 18 місяців. Таким чином, економія склала 40% від бюджету.

2.2.2 Проблема великих витрат на узгодження проєктів на базі натурних прототипів

Обговорення проєкту не з кресленнями і зображенням на моніторі, а з прототипом в масштабі 1:1 знижує витрати і час на підготовку до макетної комісії. Крім того, наочна перевірка проєкту і можливість його «доторкнутися» допомагає виявити помилки на ранніх стадіях проєктування.

Приклад: Автомобільна компанія SEAT за рахунок використання віртуальної реальності зменшила тривалість виробництва і скоротила кількість макетів. За час розробки нового автомобіля аналізується до трьох мільйонів деталей. Завдяки технологіям перегляду в VR, де модель представлена в реальному масштабі, скоротився час аналізу конструкції і кількість фізичних прототипів. За підсумком завдяки цьому підходу скоротився час виробництва.

2.2.3 Проблема нестачі практичного досвіду у фахівців і псування ними дорогого устаткування

Обговорення плану евакуації, навчання і тестування персоналу не з кресленнями і зображеннями, а з прототипом будівлі в масштабі 1:1 дозволяє підвищити швидкість і якість навчання, і зменшити витрати на підготовку фахівців до роботи зі складним обладнанням, знизити ризик аварії на виробництві або поломки дорогого устаткування. Помилка не призведе до аварії або поломки, а співробітник отримає реальний досвід. Одночасно з проєктуванням цехів

можливо паралельне навчання операторів, які в подальшому будуть там працювати. При відкритті оновленої ділянки співробітники зможуть відразу взятися за роботу і не витратити час на навчання. Також в VR можна провести тестування налаштувань заводських ліній. Швидкість виробництва, якість продукції, що випускається, відіграє важливу роль в успіху підприємства, тому так важливо економити час на процесах, які можуть протікати паралельно один одному. За допомогою VR можна імітувати позаштатні ситуації. Найчастіше відтворити такі випадки в реальному житті або небезпечно, або занадто дорого, тому персонал знав тільки в теорії, як вийти зі складної або аварійної ситуації. Із застосуванням технологій віртуальної реальності персонал може бути готовий до будь-якої проблеми.

Приклад: Ford скоротив кількість травм на виробництві на 70% і знизив ергономічні проблеми на 90%. За допомогою VR лабораторії тут прагнуть поліпшити і зробити безпечним монтажну лінію і робочий простір оператора. Для аналізу використовуються більше 52 датчиків, які розташовуються на тілі людини. Вони зчитують рухи і передають координати в базу даних. Ергономіст, отримавши значення, може відіграти певні сценарії і убезпечити життя робочого.

2.2.4 Проблема довгого узгодження проєкту через велику кількість учасників з різних підрозділів і різних міст, що супроводжується великими витратами на відрядження

Для обговорення проєкту не потрібно знаходитися в одному приміщенні, але важливо перебувати в одному віртуальному просторі (рис. 2.5), що забезпечують шоломи віртуальної реальності і відповідне ПЗ. Колективне обговорення і демонстрація проєкту в VR скорочує витрати на відрядження і час на узгодження проєкту.

Приклад: CNES, французький національний космічний центр, за рахунок використання коштів віртуальної реальності заощадив близько 12 місяців при розробці проєкту Callisto терміном на 4 роки. Ракетний прискорювач проєктувався в САПР, а в VR проводився детальний розбір літального апарату і допоміжних елементів для запуску. Це дозволило обговорювати проєкт віддалено,

проаналізувати, які інструменти необхідні для складання, розмір будівлі, процес транспортування на місце старту, і виконати тестування всієї системи в цілому. Цей проєкт показав можливість одночасного вирішення різних завдань.



Рисунок 2.5 – Зібрання з узгодження проєкту у VR

Отже можна сказати, що VR вже давно є незамінним помічником для вирішення промислових завдань. Адже саме завдяки застосуванню VR-технологій для вирішення своїх проблем провідним світовим корпораціями вдалося в якихось випадках заощадити від 8 до 12 місяців від загального часу на розробку проєкту, знизити на 70% кількість травм на новому виробництві і на 90% позбутися ергономічних проблем [11].

Переваги застосування VR візуалізації:

- можливість навчання нового персоналу на віртуальному прототипі дорогого обладнання;
- великий потенціал ширшого інтегрування технології у більшу кількість виробничих процесів;
- економія часу при проектуванні нових виробів;

- заощадження матеріально-технічної бази під час попереднього виробництва;
- зменшення конструкторської документації;
- підвищення якості виробу за рахунок більш якісного опрацювання ергономічних, ремонтних і експлуатаційних характеристик;
- відсутність необхідності присутності при узгодженні проектів;
- зниження травм на виробництві;
- відображення моделей виробів в масштабі 1:1.

Недоліки застосування VR візуалізації:

- важкі і незручні шоломи, великі гарнітури;
- просторова обмеженість при переміщенні;
- висока вартість обладнання;
- необхідність у висококваліфікованих спеціалістах;
- технічні обмеження;
- залежність від продуктивної потужності ПК;
- відсутність безпосереднього сумісності з платформами і інтеграція з іншими програмами;
- нудота, запаморочення, головний біль, втома очей та загальне навантаження на організм;
- втрата орієнтації, відчуття часу, реальності;
- зіткнення з об'єктами реального світу, ризик травм [12].

2.3 Метод графічної візуалізації в САПР

В рамках життєвого циклу промислових виробів САПР вирішує завдання автоматизації робіт на стадіях проектування і підготовки виробництва.

Основна мета використання САПР - підвищення ефективності праці інженерів, включаючи:

- скорочення трудомісткості проектування і планування;
- скорочення термінів проектування;

- скорочення собівартості проєктування і виготовлення, зменшення витрат на експлуатацію;
- підвищення якості та техніко-економічного рівня результатів проєктування;
- скорочення витрат на натурне моделювання та випробування.

Досягнення цих цілей забезпечується шляхом:

- автоматизації оформлення документації;
- інформаційної підтримки та автоматизації процесу прийняття рішень;
- використання технологій паралельного проєктування;
- уніфікації проєктних рішень і процесів проєктування;
- повторного використання проєктних рішень, даних і напрацювань;
- стратегічного проєктування;
- заміни натурних випробувань і макетування математичним моделюванням;
- підвищення якості управління проєктуванням;
- застосування методів варіантного проєктування і оптимізації [13].

2.3.1 Розповсюджені САПР на підприємствах

В даний час найбільш часто на підприємствах використовуються наступні САПР для графічної візуалізації:

- Solidworks;
- Siemens NX;
- Autodesk Inventor.

SolidWorks є ядром інтегрованого комплексу автоматизації підприємства, за допомогою якого здійснюється підтримка життєвого циклу виробу згідно з концепцією CALS — технологій, включаючи двонаправлений обмін даними з іншими Windows-застосунками та створення інтерактивної документації.

Конструкторська підготовка виробництва:

- 3D проєктування виробів (деталей і збірок) будь-якого ступеня складності з урахуванням специфіки виготовлення;

- створення конструкторської документації;
- промисловий дизайн;
- проектування комунікацій (електроджгутів, трубопроводи тощо.).
- інженерний аналіз (міцність, стійкість, теплопередача, частотний аналіз, динаміка механізмів, газо / гідродинаміка, оптика і світлотехніка, електромагнітні розрахунки, аналіз розмірних ланцюгів і ін.).

- експрес-аналіз технологічності на етапі проектування

Технологічна підготовка виробництва:

- проектування оснащення та інших засобів технологічного оснащення;
- аналіз технологічності конструкції вироби;
- аналіз технологічності процесів виготовлення (ліття пластмас, аналіз процесів штампування, витяжки, гнуття та ін.);
- розробка технологічних процесів;
- матеріальне та трудове нормування;
- механообробка: розробка керуючих програм для верстатів. Фрезерні, токарні, токарно-фрезерні і електроерозійна обробка, лазерна, плазмове різання, вирубні штампи, координатно-вимірювальні машини [14].

NX (раніше «Unigraphics») - флагманська CAD / CAM / CAE-система виробництва компанії Siemens PLM Software. Програма використовує ядро геометричного моделювання Parasolid.

Набір додатків, що знаходяться в пакеті NX CAD, дозволяє вирішити завдання розробки повного електронного виготовлення всіх виробів та його складових часів для подальшого використання в технологічних технологічних заготовках виробництва.

Функціональність додатків дозволяє автоматизувати етапи проектування виробів та випуск конструкторської документації у різній формі представлення. Підтримуються технології проектування як «зниження вгору», так і «зверху вниз» з можливістю побудови наскрізних процесів розробки з вимог до виробу до етапу видачі даних для виробництва.

Засоби промислового дизайну в NX призначені для розробки зовнішнього вигляду (або інтер'єру) проєктованого виробу та аналізу його естетичних і візуальних характеристик. Дана функціональність дозволяє автоматизувати процеси розробки дизайну від оцифровки або створення двовимірних скетчів до аналізу технологічних процесів виготовлення елементів зовнішнього вигляду і проєктування відповідної оснастки [15].

Autodesk Inventor — 3D САПР для створення і вивчення поведінки цифрових прототипів виробів і деталей. Розробник компанія Autodesk.

Використовується в основному в машинобудуванні. В комплект входить декілька продуктів: Autodesk Inventor Suite, Autodesk Inventor Routed Systems Suite (проєктування кабельних і трубопровідних систем, в том числі для розводки складних ділянок трубопроводів, електричних кабелів і проводів), Autodesk Inventor Simulation Suite (засоби моделювання руху і аналізу навантажень, які спрощують вивчення поведінки виробу в реальних умовах ще на стадії проєктування).

Інструменти Inventor забезпечують повний цикл проєктування і створення конструкторської документації:

- 2D- / 3D-моделювання;
- створення виробів з листового матеріалу та отримання їх розгорток;
- розробка електричних і трубопровідних систем;
- проєктування оснащення для лиття пластмасових виробів;
- динамічне моделювання;
- параметричний розрахунок напружено-деформованого стану деталей і збірок;
- візуалізація виробів;
- автоматичне отримання і оновлення конструкторської документації (оформлення по ЄСКД чи до вимог технічного кресленника).

Функціональні можливості

Компонувальні схеми, що поєднують окремі деталі і вузли. Користувачі можуть перевірити можливість складання об'єкта, додати і позиціонувати нові частини, а також усунути перешкоди (недоліки) між частинами проекту.

Ливарні форми і оснащення. Програма автоматизує ключові аспекти процесу проектування ливарних форм під тиском. Користувачі можуть швидко створювати і перевіряти конструкції форм, а потім експортувати їх в Autodesk Moldflow.

Деталі з листового матеріалу. Спеціальне середовище проектування виробів з листового матеріалу автоматизує багато аспектів роботи. Користувачі можуть створювати деталі розгортки, гнуті профілі, формувати фланці шляхом 3D-моделювання і вставляти в деталі спеціалізовані кріпильні елементи.

Генератор рам служить для проектування каркасів (рам) на основі стандартних профілів. Рами створюються шляхом розміщення стандартних сталевих профілів на каркасі. Формування кінцевих умов спрощується завдяки наявності стандартних опцій для кутових з'єднань і з'єднань встик. Користувачі можуть створювати власні профілі і додавати їх в бібліотеку.

Кабельні та трубопровідні системи. Середовище для створення трубопроводів допомагає проектувати їх таким чином, щоб вписати в складну збірку або обмежений простір. Вона включає бібліотеку стандартних фітінгів, труб і шлангів, і забезпечує створення складальних креслеників, які оновлюються в межах змін вихідної 3D-моделі.

Є можливість доповнення бібліотек стандартних елементів [16].

Порівняльна таблиця мінімальних системних вимог САПР представлена в таблиці 2.1

Таблиця 2.1 – Minimum system requirements

	Solidworks 2021	Autodesk Inventor 2021	Siemens NX 1953
OS	Win 10 64x	Win 10 64x	Win 7/Win 10 64x
Processor	3.3 GHz	2.5 GHz	2.4 GHz
RAM	8 ГБ	16 ГБ	4 ГБ
Memory	2 ГБ	40 ГБ	25 ГБ
CAD level	Level 2	Level 2	Level 3
Price	\$3995	\$2,190 /year	\$2241

2.4 Вибір методу графічної візуалізації

В результаті порівняння методів графічної візуалізації, для виконання обираємо метод візуалізації в САПР, а саме у Siemens NX.

Siemens NX має найнижчі мінімальні системні вимоги, є САПР верхнього рівня, та має нижчу ціну порівняно з іншими конкурентами, що дозволить використовувати методику на більшості малих та середніх підприємств.

3 МЕТОДИКА СТВОРЕННЯ ГРАФІЧНОЇ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ СКЛАДАННЯ

3.1 Послідовність методики створення графічної візуалізації процесу складання

Послідовність створення наведена на наступній блок-схемі (рис. 3.1).



Рисунок 3.1 – Блок-схема алгоритму методики створення графічної візуалізації процесу складання.

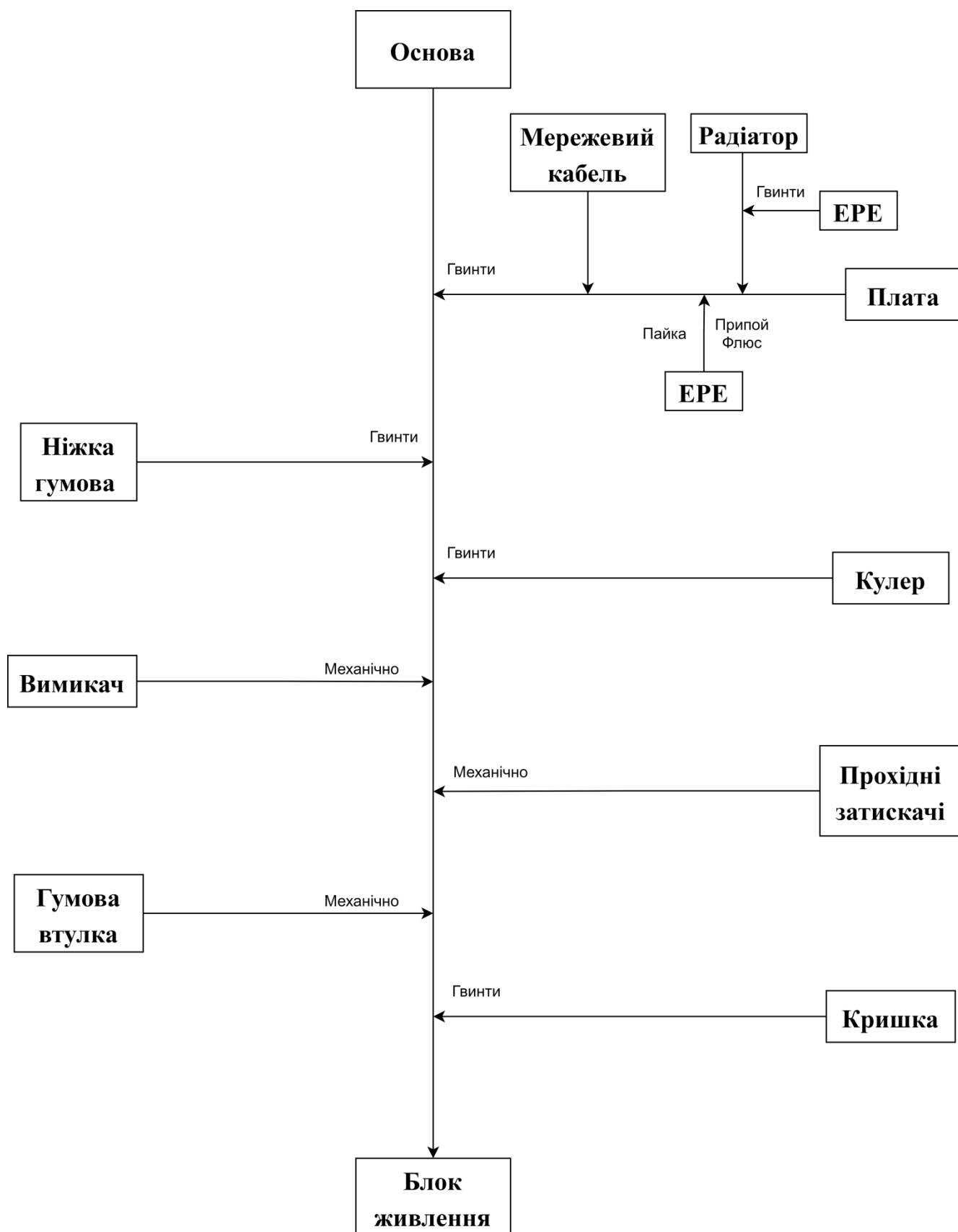


Рисунок 3.3 – Технологічна схема складання

3.2 Приклад використання методики створення графічної візуалізації процесу складання

Для створення графічної візуалізації процесу складання виробу у Siemens NX використовуються файли моделей. Файли моделей – це файли унікального призначення. Їх можна використати для таких задач, як:

- створення рознесеного виду збірки, який потім можна використовувати для створення файлу креслення;
- створення анімації покрокового складання або розбирання виробу. Вона, як правило, може включати зміни виду і стану видимості компонентів для кожного етапу процесу складання.

Першим кроком буде створення файлу збірки, для цього потрібно обрати «Файл > Новый.. > Assembly» (рис. 3.4):

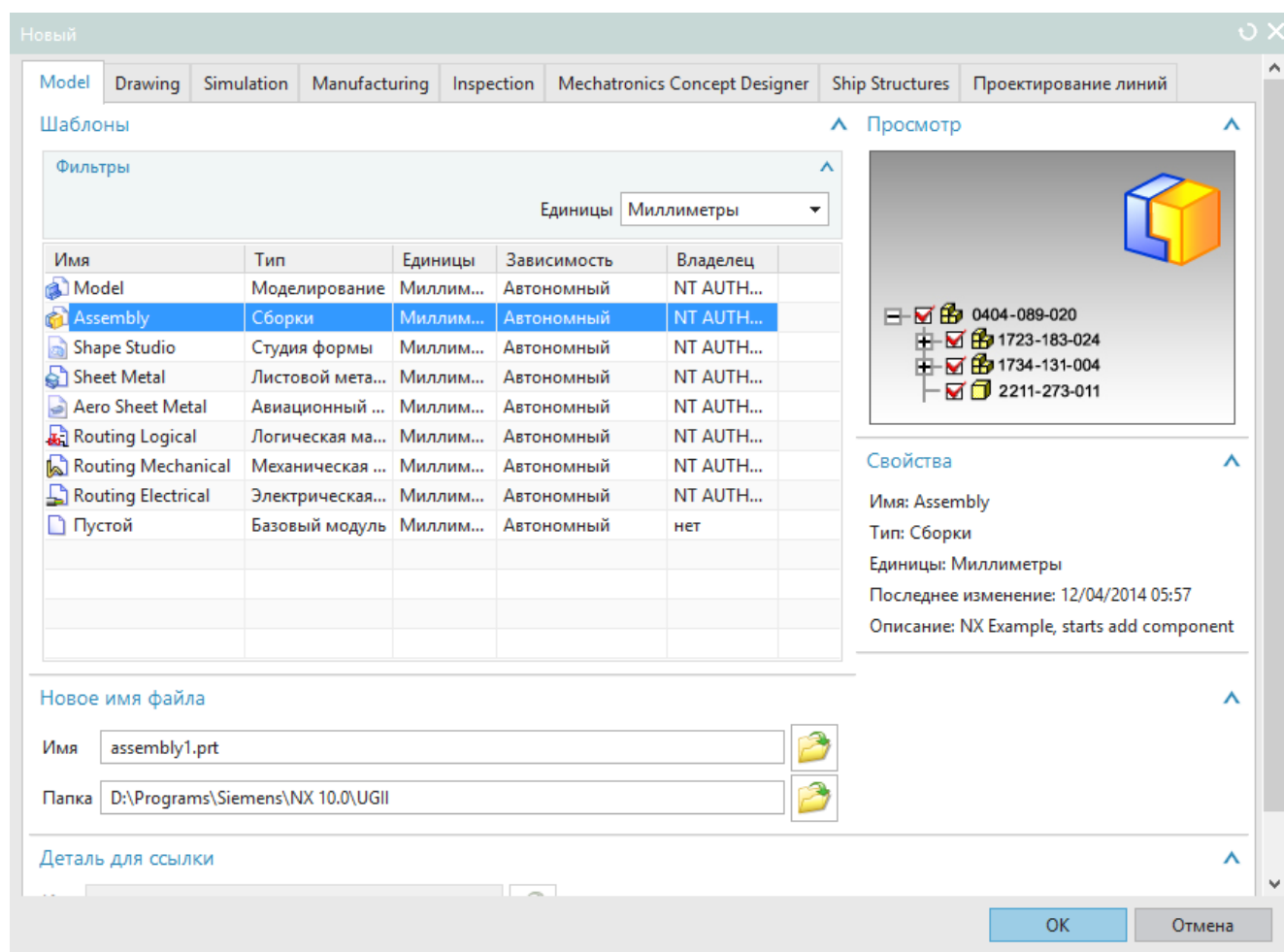


Рисунок 3.4 – Створення файлу збірки

У новоствореному файлі розміщуємо моделі необхідних деталей та підбірок натискаючи «Добавить > Открыть» (рис. 3.5):

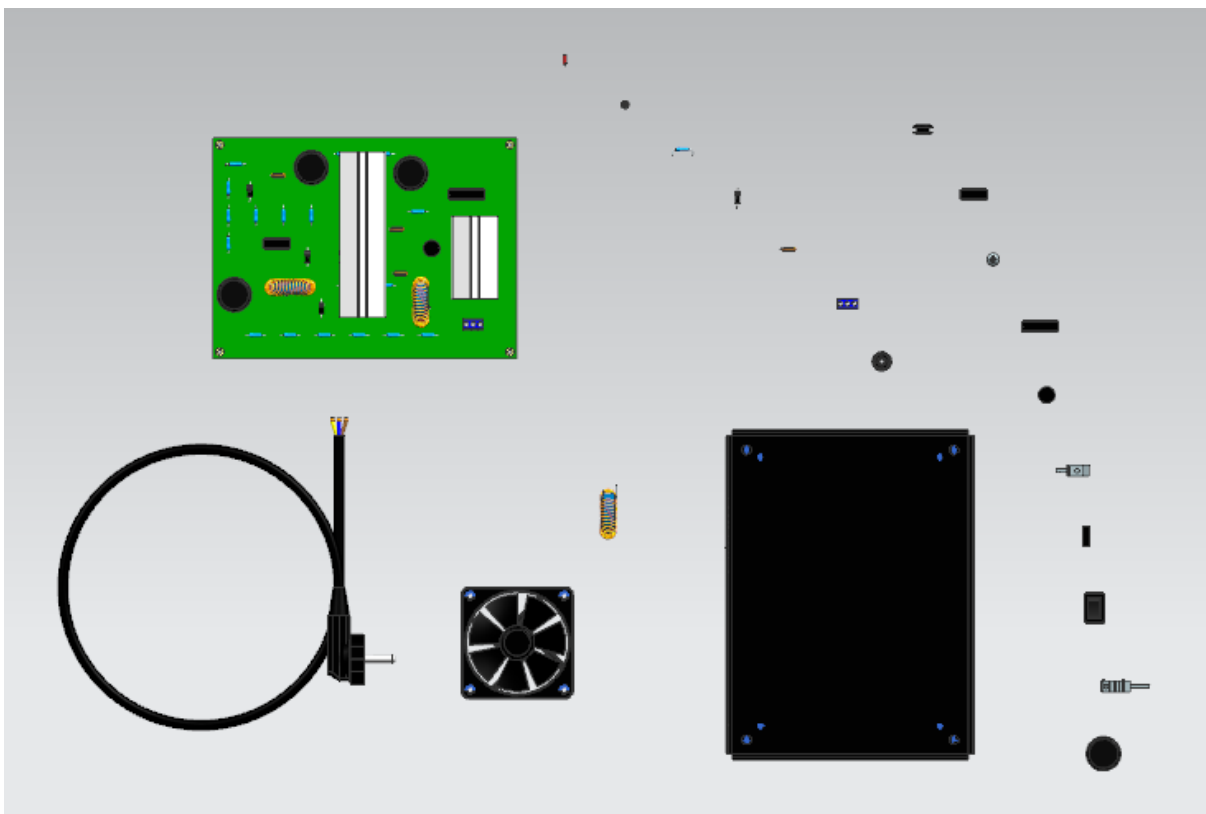


Рисунок 3.5 – Розміщення моделей для складання

За основу обираємо корпус виробу, навколо якого буде відбуватись подальше складання. Між кожною деталлю та корпусом потрібно накласти наступні спряження (рис. 3.6):

- концентричність - поєднує дугові або еліптичні ребра компонентів так, щоб їх центри збігалися і вони лежали в одній площині;
- відстань - задає мінімальну відстань в просторі між двома об'єктами;
- паралельність;
- перпендикулярність;
- з'єднання - жорстко з'єднує разом два компоненти, ніби утворюючи з них єдине тіло;
- вирівнювання за дотиком - обмежує два компонента для вирівнювання або дотику;

- кут - задає кутовий розмір між двома об'єктами;
- фіксація - фіксує компонент в поточній позиції;
- центр - вирівнює центри одного або двох об'єктів щодо пари об'єктів.

Центрує пару об'єктів по іншому об'єкту;

- оптимізація - з'єднує дві циліндричні межі з рівними радіусами.

Зазвичай використовується при розміщенні кріплення в отворах [13].

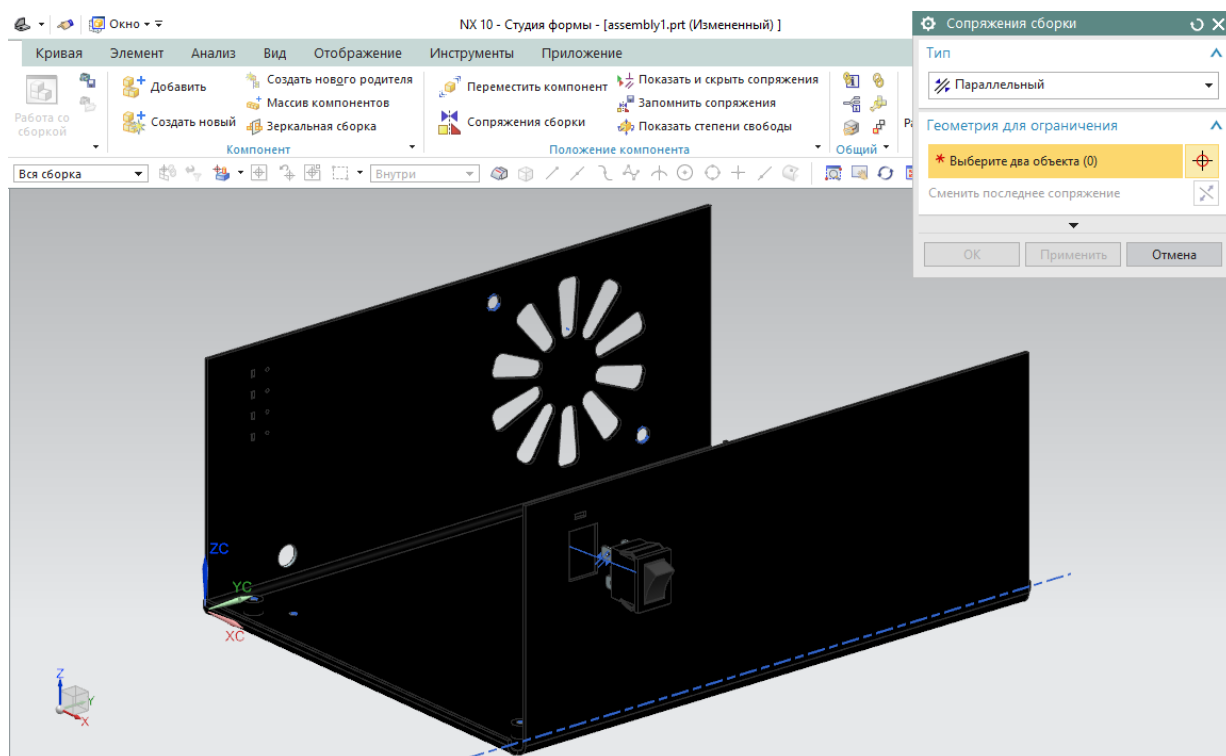


Рисунок 3.6 – Накладення спряжень на збірку

Після накладення усіх необхідних «спряжень» збірка готова для створення файлу анімації (рис 3.7).

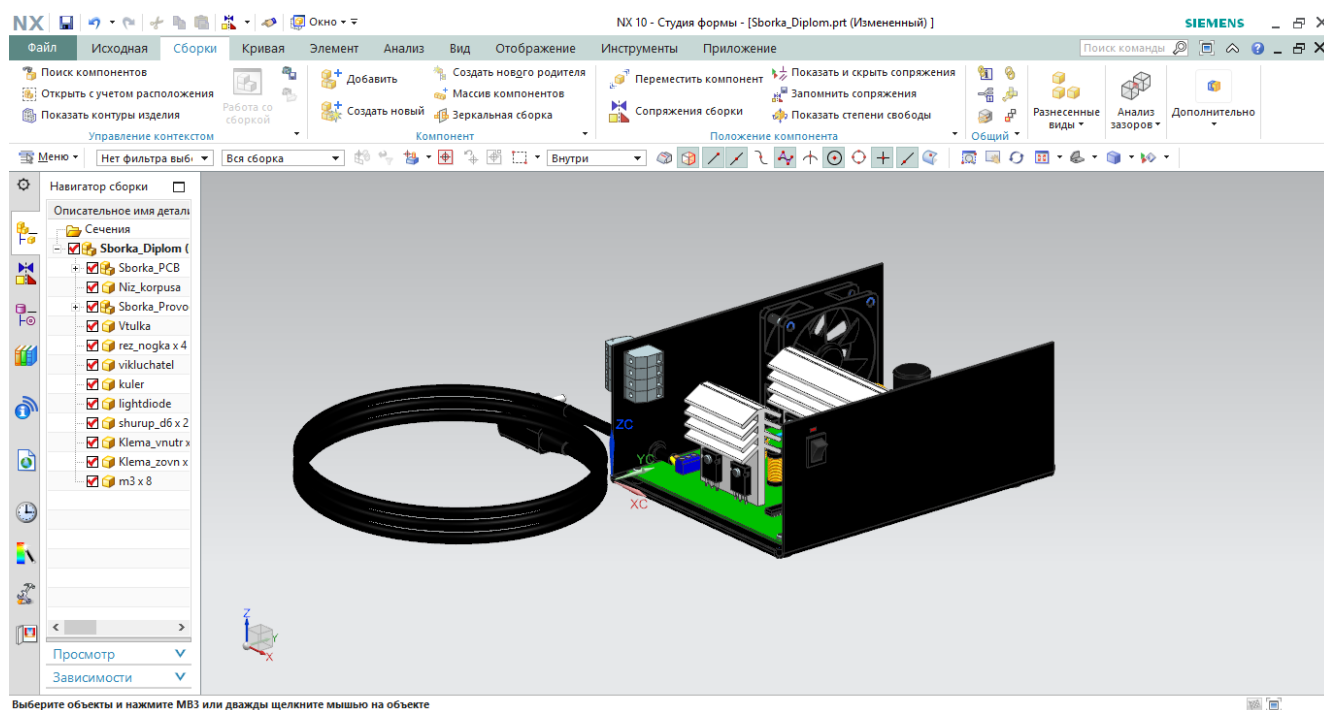


Рисунок 3.7 – Збірка блоку живлення

Далі у вкладці «Сборки» обираємо «Общий > Последовательность» (рис.3.8):

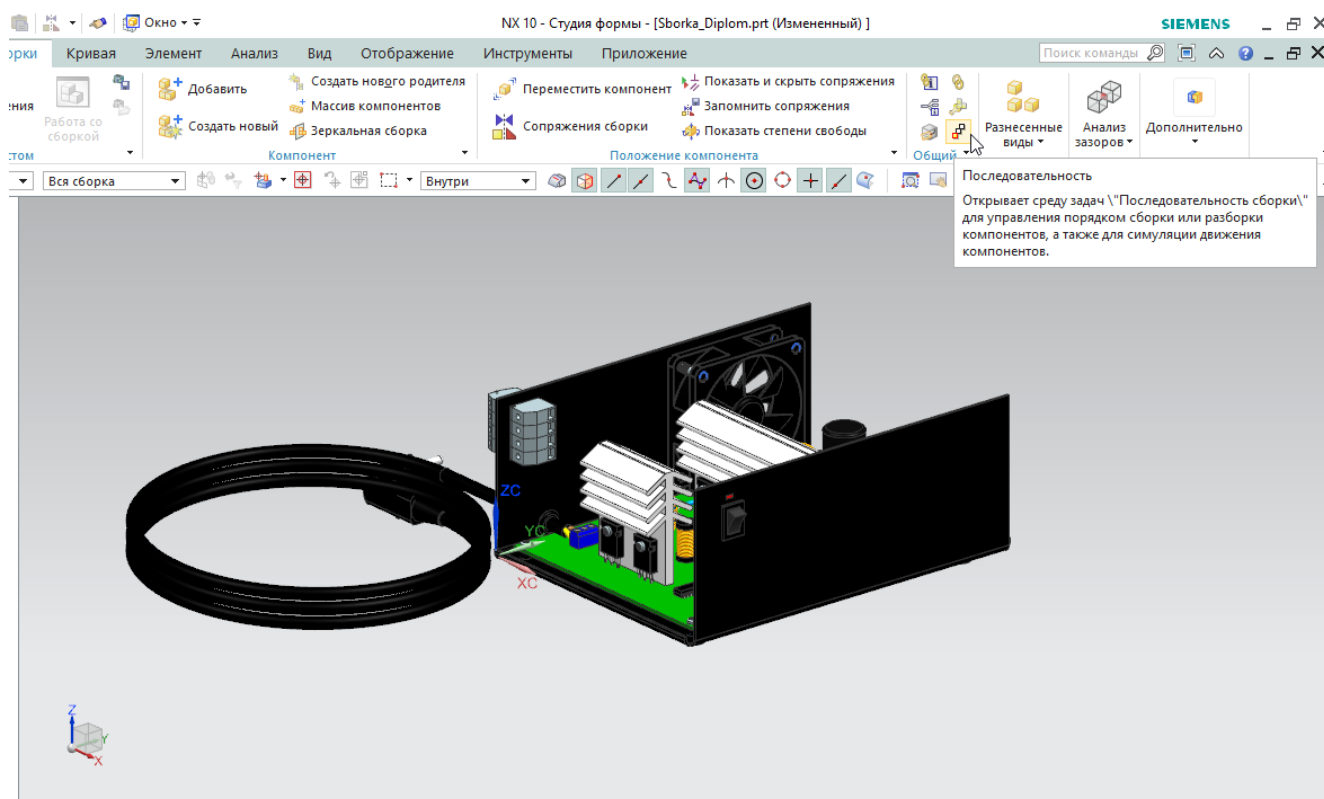


Рисунок 3.8 – Инструмент «Последовательность»

Першим кроком обираємо необхідний вид камери та, натискаючи «Зафиксировать позицию камеры», фіксуємо камеру. Далі необхідно покроково розібрати попередню складену модель виробу. Натискаючи «Вставить движение» обираємо деталь та відстань, на яку її потрібно перемістити. За необхідності, перед та після кожної фіксації камери вставляється пауза (рис. 3.9):

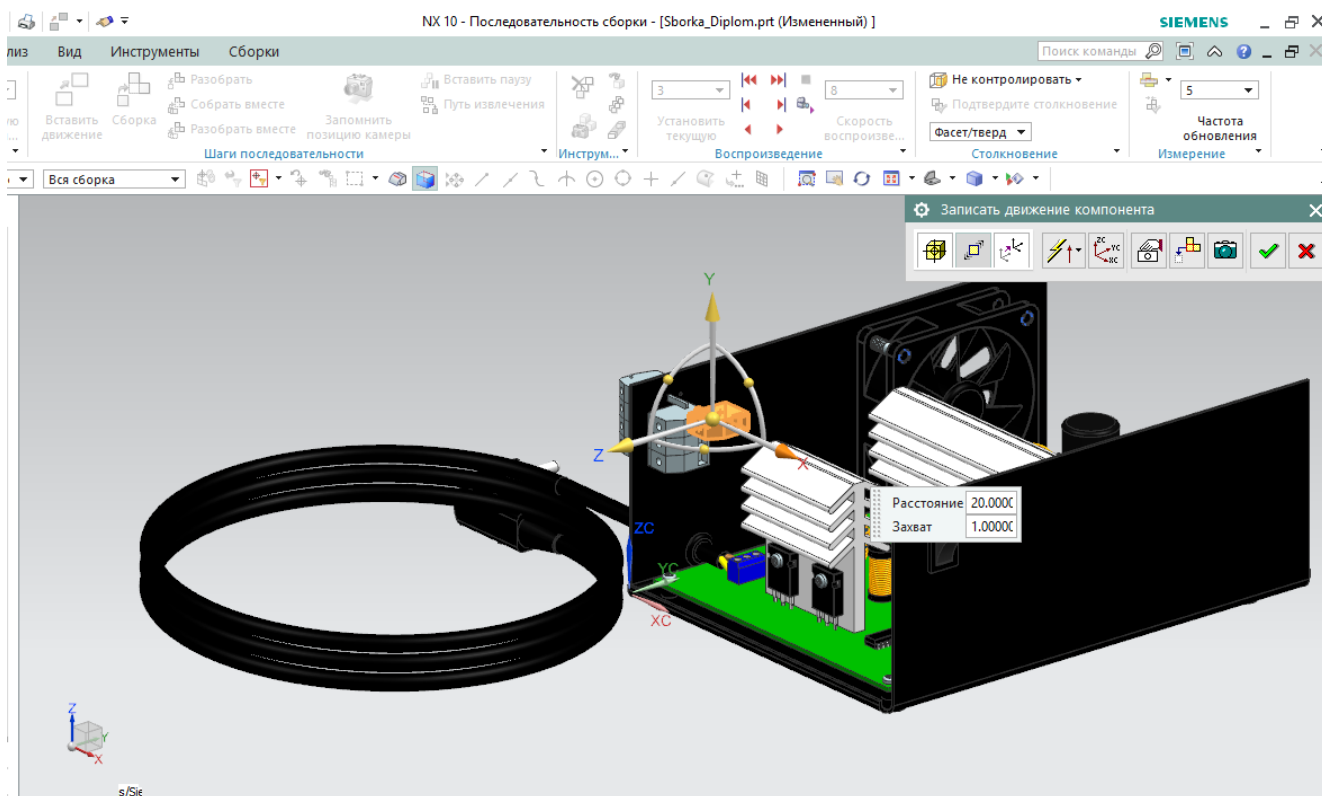


Рисунок 3.9 – Запис руху компонента

Коли прилад повністю розібраний та записані рухи всіх компонентів, обираємо швидкість відтворення складання. Для перевірки успішності відтворення процесу розбирання приладу натискаємо «Столкновение > Остановка перед столкновением» (рис. 3.10). У разі зіткнення, процес анімації зупиняється, після чого треба повернутись на етап запису руху компонентів та змінити налаштування відстані зміщення компонентів.

Після перевірки успішності повного завершення процесу складання тиснемо на «Экспорт в видеоролик» (рис. 3.11), програма відтворює процес в зворотній послідовності. Обираємо розташування файлу та зберігаємо.

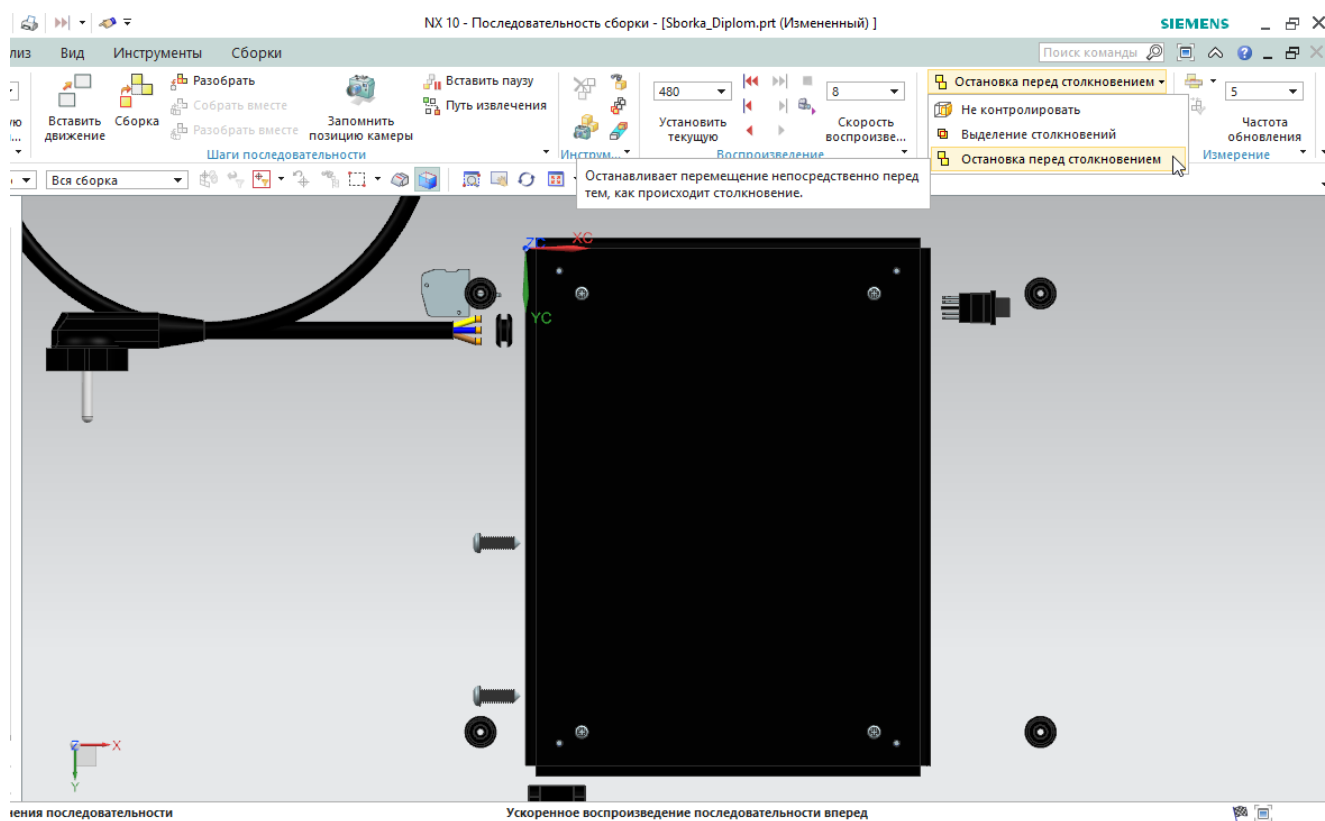


Рисунок 3.10 – Перевірка на зіткнення

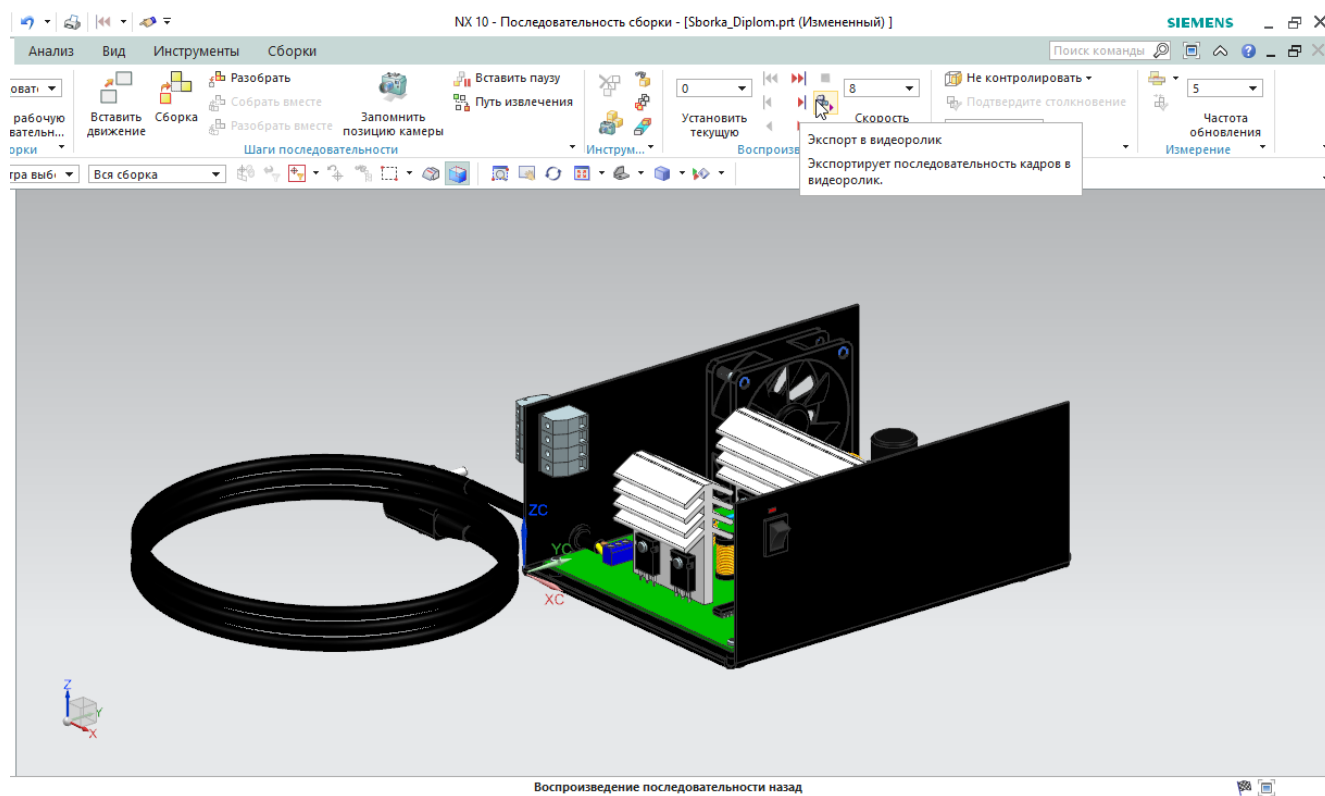


Рисунок 3.11 – Экспорт файла графічної анімації

Отриманий файл передається на ділянку складання для подальшого використання.

ВИСНОВКИ

В ході виконання дипломного проєкту були розглянуті особливості складання РЕА та проведений огляд існуючих способів графічної візуалізації складальних процесів, в результаті чого було вирішено обрати систему САПР верхнього рівня Siemens NX.

За результатами виконання дипломного проєкту можна зробити наступні висновки:

- запропонована методика покликана доповнити комплект конструкторської документації для процесу складання виробів РЕА;
- методика вирішує низку проблем пов'язаних з навчанням персоналу
- знижує кількість необхідних робітників на один виріб;
- пришвидшує опанування кожного наступного нового приладу.

Рекомендується застосовувати малим та середнім виробничим підприємствам, так як не потребує додаткових витрат. Крім того, може бути застосована у більшості САПР, що вже використовуються на підприємствах.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Сборка радиоэлектронной аппаратуры [Электрон. ресурс] – Режим доступа: <http://korpusa-trekom.ru/sborka-radioehlektronnoj-apparatury.html>
2. Технология и автоматизация производства радиоэлектронной аппаратуры: Учебник для вузов/ И. П. Бушминский, О.Ш. Даутов, А.П. Достанко и др.; Под редю А. П. Достанко, Ш. М. Чабрадрова. - М.:Радио и связь, 1989. - 624 с.: ил.
3. Особенности сборочно-монтажных технологических процессов [Электрон. ресурс] – Режим доступа: <https://tepka.ru/radiomontazhnik/1.html>
4. Особенности сборки и монтажа электрических схем [Электрон. ресурс] – Режим доступа: <https://radiostorage.net/1100-osobennosti-sborki-i-montazha-ehlektricheskikh-skhem.html>
5. Складальні креслення [Электрон. ресурс] – Режим доступа: <https://www.kreslennja.com.ua/lesson.php?id=40>
6. Как дополнения реальность помогает производствам [Электрон. ресурс] – Режим доступа: <https://www.orange-business.com/ru/blogs/kak-dopolnennaya-realnost-pomogaet-proizvodstvam>
7. Автоматизовані системи. Терміни та визначення: ДСТУ 2226-93. – [Чинний від 1994-07-01]. – К.: Держстандарт України, 1993. – 86 с. – (Національний стандарт України).
8. Технологии виртуальной и дополненной реальности: возможности и препятствия применения [Электрон. ресурс] – Режим доступа: <https://www.jsdrm.ru/jour/article/view/787#>
9. Преимущества VR/AR технологий для судостроения [Электрон. ресурс] – Режим доступа: https://www.korabel.ru/news/comments/preimuschestva_vr_ar_tehnologiy_dlya_sudostroeniya.html
10. Как сотрудники подрядчика NASA используют очки дополненной реальности Microsoft AR HoloLens для сборки узлов Orion [Электрон. ресурс] –

Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/427727/>

11. Применение VR-технологий [Электрон. ресурс] – Режим доступа: <https://helmeton.ru/blog/technologii-vr/>

12. VR в промышленности [Электрон. ресурс] – Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/509374/>

13. Система автоматизированного проектирования [Электрон. ресурс] – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Система_автоматизированного_проектирования

14. SolidWorks [Электрон. ресурс] – Режим доступа: <https://uk.wikipedia.org/wiki/SolidWorks>

15. NX [Электрон. ресурс] – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/NX_\(система_автоматизированного_проектирования\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/NX_(система_автоматизированного_проектирования))

16. Autodesk Inventor [Электрон. ресурс] – Режим доступа: https://uk.wikipedia.org/wiki/Autodesk_Inventor

17. Глава 4. Сборки [Электрон. ресурс] – Режим доступа: https://media.plm.automation.siemens.com/ru_ru/nx/book/chapter-4.pdf

18. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційних проєктів (робіт) для студентів спеціальностей 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», 172 «Телекомунікації та радіотехніка» усіх форм навчання освітнього ступеню «бакалавр». / Уклад.: Поспєєва І.Є., Шило Г.М., Куляба-Харитоновна Т.І., Фурманова Н.І., Коновалова І.П. – Запоріжжя: НУЗП, 2021. – 36 с

19. Требования к системе для Autodesk Inventor 2022 [Электрон. ресурс] – Режим доступа: <https://knowledge.autodesk.com/ru/support/inventor/learn-explore/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/RUS/System-requirements-for-Autodesk-Inventor-2022.html>

20. Справка по SOLIDWORKS [Электрон. ресурс] – Режим доступа: http://help.solidworks.com/2021/RUSSIAN/SolidWorks/install_guide/c_viz_prereqs_system_reqs.htm

21. Siemens NX v1953 Build 1700 NX 1953 manual [Электрон. ресурс] – Режим доступа: <https://www.fullversiondl.com/siemens-nx-v1953-build-1700-nx-1953/>

22. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання: ДСТУ 3008:2015 – [Чинний від 2017-07-01]. – К.: Держстандарт України, 2015. – 31 с. – (Національний стандарт України).

23. Практическое использование NX Данилов Ю., Артамонов И. Практическое использование NX. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 332 с.: ил

24. Технологии VR и AR на производстве [Электрон. ресурс] – Режим доступа: <https://www.henkel.ru/spotlight/2021-02-02-vr-and-ar-technologies-in-production-1147350>

25. Как технологии виртуальной реальности меняют будущее производства [Электрон. ресурс] – Режим доступа: <https://www.ge.com/news/reports/как-технологии-виртуальной-реальнос>