

**Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»**

Кафедра «Інтегровані технології машинобудування» ім. М.Ф. Семко

**Удосконалення технологічної підготовки виготовлення складного виробу
з використанням SLS-методу**

Ланін Іван Андрійович

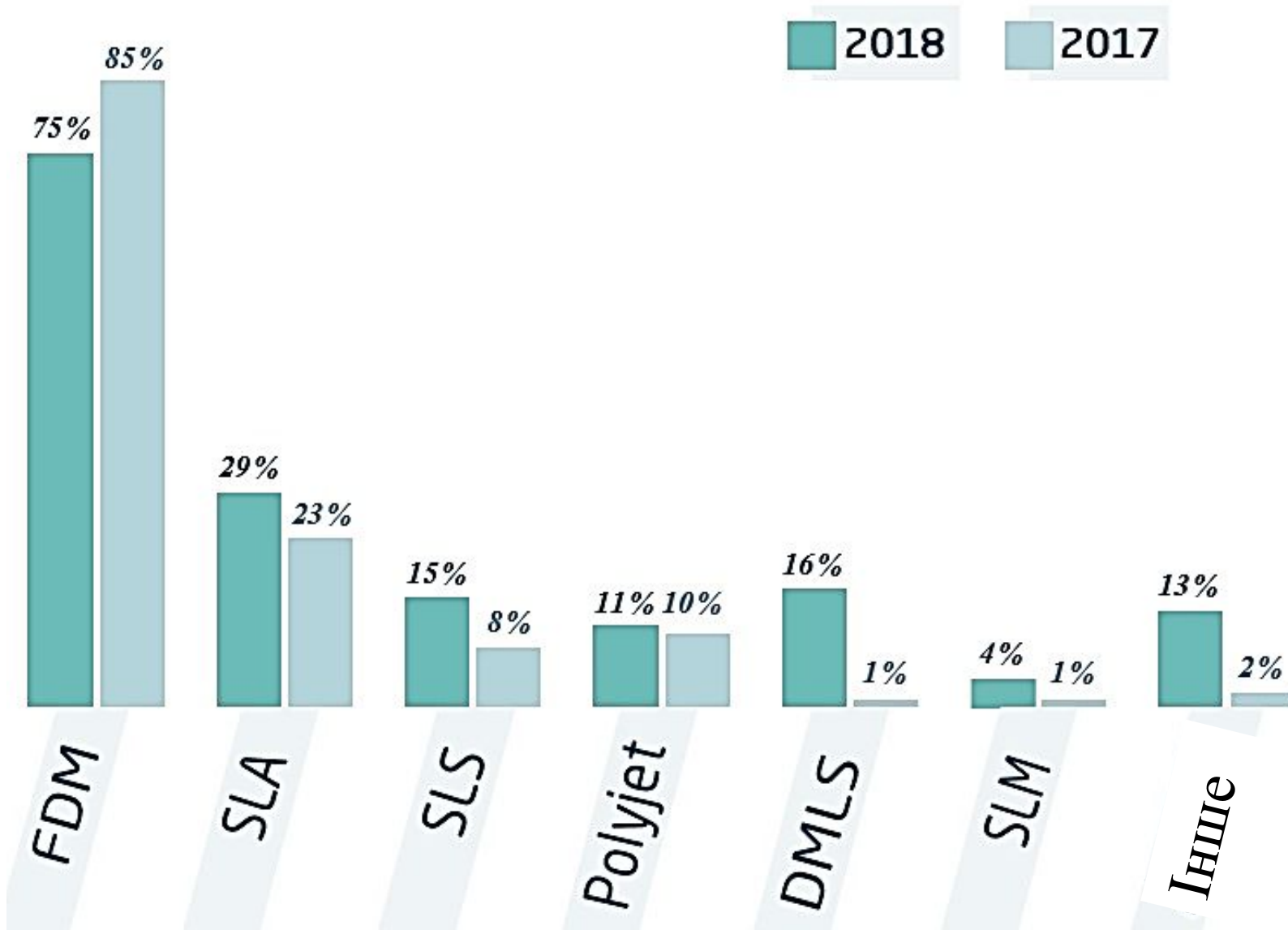
Керівник: доц. Гаращенко Я.М.

Харків - 2019

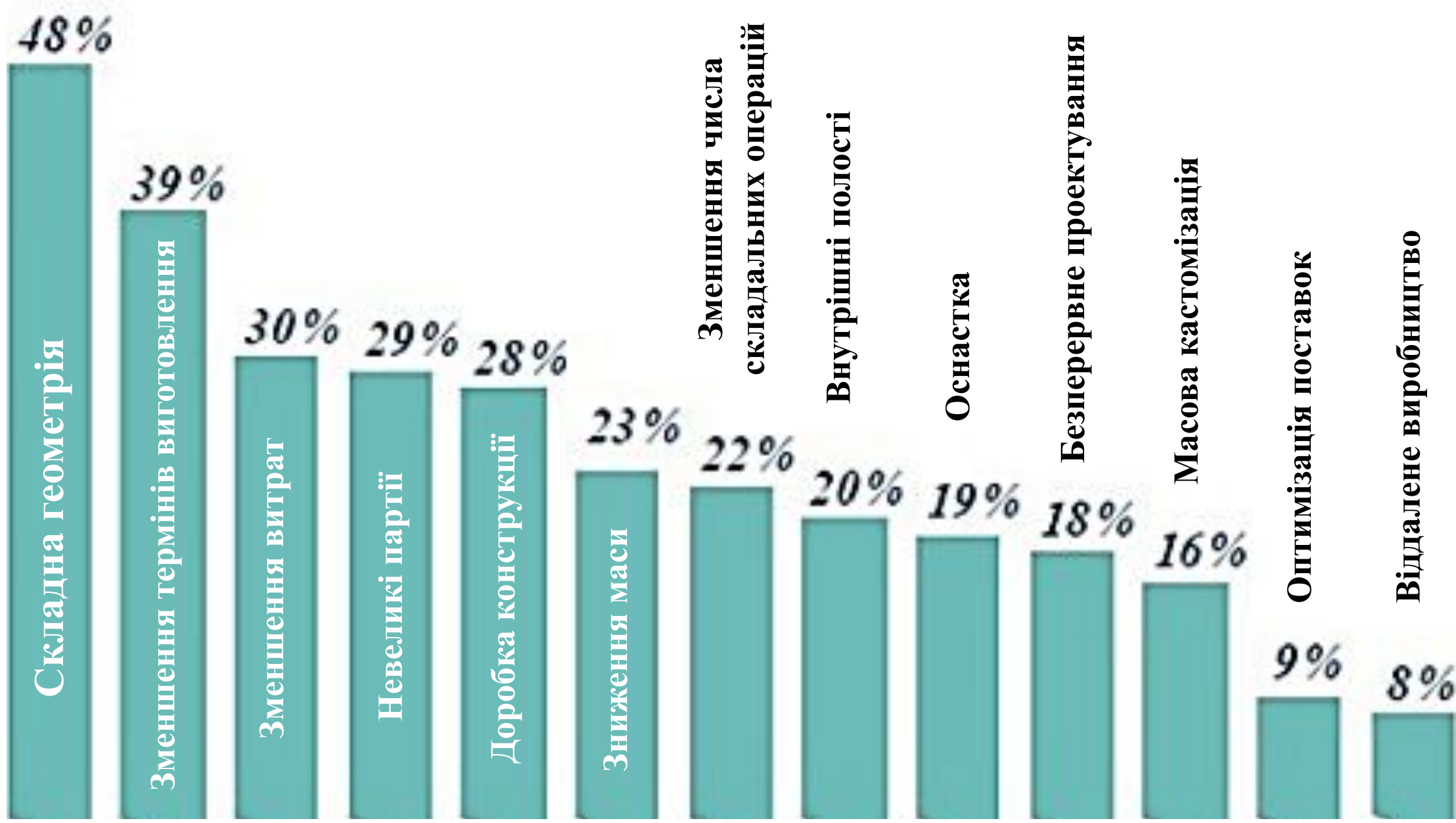
РИНОК АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Використовуване обладнання у машинобудівному виробництві

Матеріали використовувані для 3D-друку



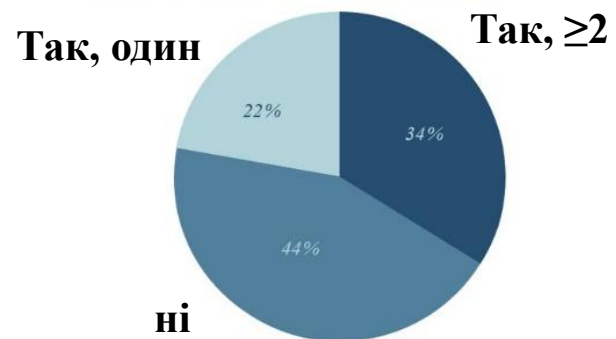
ПЕРЕВАГИ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ



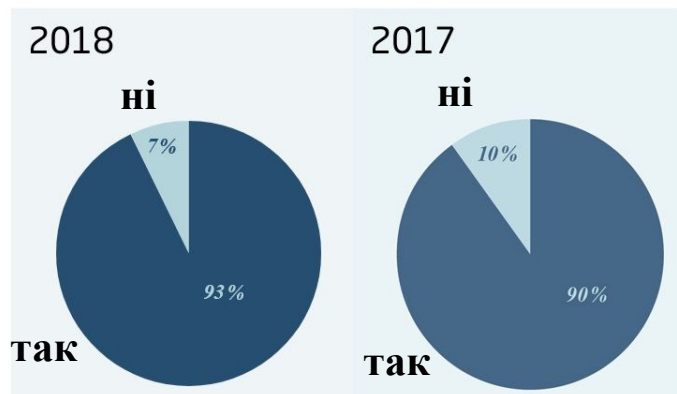
ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Опитування експертів та інженерів промислових компаній

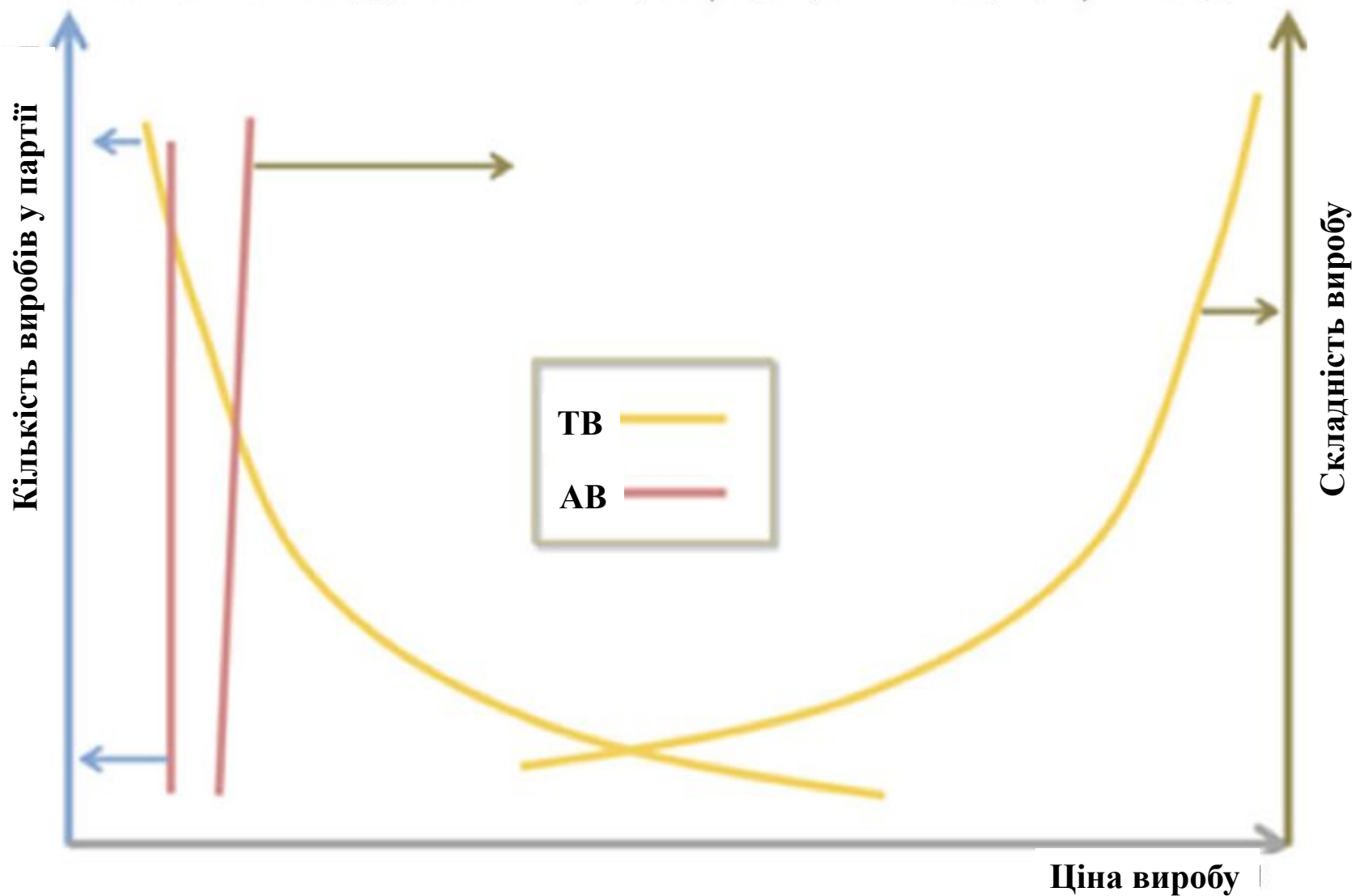
Компанія має власний 3D-принтер?



Адитивні технології надають переваги у конкуренції за ринок збуту товару?



Рентабельність адитивного (АВ) та традиційного (ТВ) виробництва



ПРОБЛЕМАТИКА ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Основні організаційні шляхи для максимальної вигоди з використання адитивних технологій:

- ✓ Підвищення рівня кваліфікації та підготовки співробітників.
- ✓ Маркетинг та комунікації.
- ✓ Інвестиції в 3D-принтери.
- ✓ Зниження витрат на 3D-друк.
- ✓ Збільшення обсягу продажів.
- ✓ Підвищення інтеграції 3D-друку в сфери діяльності компанії.
- ✓ Залучення фінансування.
- ✓ Поліпшення корпоративної культури та організації.

Головні тенденції, що мають вплив на ефективність використання адитивних технологій:

- ✓ Зниження витрат.
- ✓ Інновації в області матеріалів.
- ✓ 3D-друк металами.
- ✓ Швидкість.
- ✓ 3D-друк в медицині і біодрук.
- ✓ Якість і точність.
- ✓ 3D-друк для масового виробництва.

СИСТЕМА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ МАТЕРІАЛІЗАЦІЇ СКЛАДНИХ ВИРОБІВ АДИТИВНИМИ МЕТОДАМИ

Екранна форма системи технологічної підготовки

Технологическая подготовка материализации сложных изделий аддитивными технологиями

| MO | Вариант | Группа |
|-------------------------------------|---------|--------|
| <input type="checkbox"/> | 01 | 2018 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | 02 | 2019 |
| <input type="checkbox"/> | 03 | |
| <input type="checkbox"/> | 04 | |
| <input type="checkbox"/> | 05 | |
| <input type="checkbox"/> | 06 | |
| <input type="checkbox"/> | 07 | |
| <input type="checkbox"/> | 08 | |
| <input type="checkbox"/> | 09 | |
| <input type="checkbox"/> | 10 | |
| <input type="checkbox"/> | 11 | |
| <input type="checkbox"/> | 12 | |
| <input type="checkbox"/> | 13 | |
| <input type="checkbox"/> | 14 | |
| <input type="checkbox"/> | 15 | |
| <input type="checkbox"/> | 16 | |

English Настройки Справка О программе

Подсистемы

- Структурная обратимая декомпозиция
- Ориентация изделия в рабочей области построения
- Статистический анализ исследуемых признаков
- Послойный анализ 3D-модели изделия**
- Рациональное расположение изделий в рабочей области построения
- Визуальный анализ технологичности изделия

Внешние системы (программы)

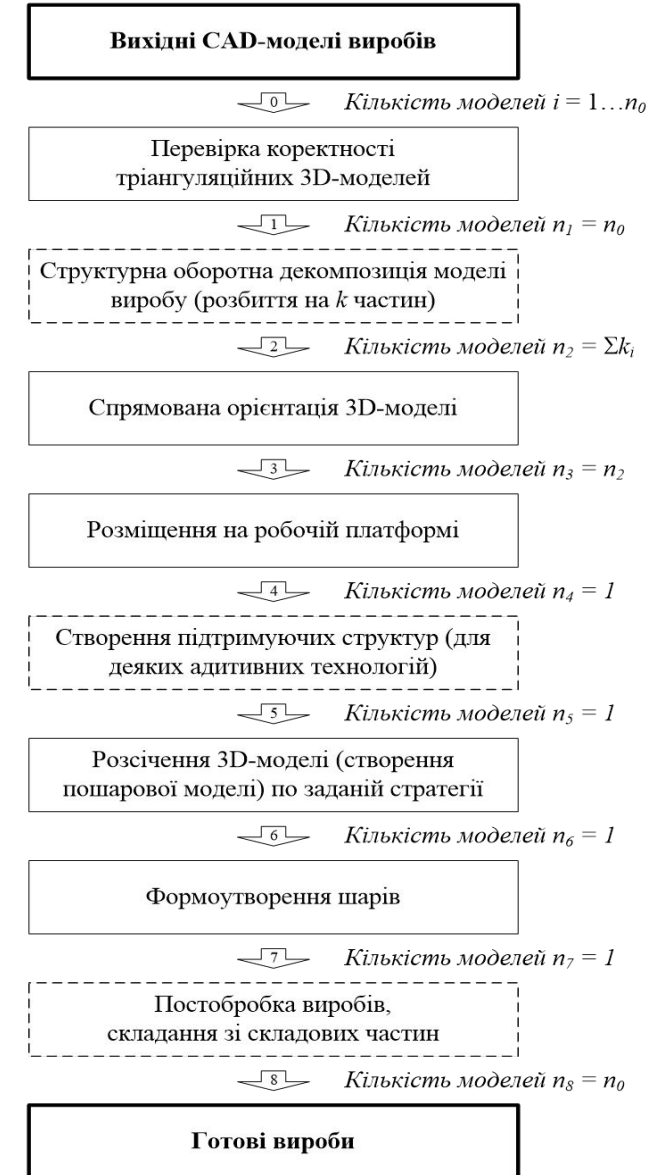
- Создание триангуляционных моделей
- Интегрированные генеративные технологии (классификация технологий, характеристики оборудования)
- Морфологический анализ триангуляционных моделей
- Статистическое моделирование рабочих процессов интегрированных технологий

Информация (история расчетов)

Создана воксельная модель.
Дата: 22.08.2019; Время: 21:50:47
Подсистема рационального расположения моделей изделий на рабочей платформе установки
Создана воксельная модель.
Создана воксельная модель.
Создана воксельная модель.
Дата: 25.09.2019; Время: 17:38:33
Подсистема послойного анализа модели

Примечание: Исследование задач упаковки

Задачі технологічної підготовки



МОДЕЛЬ СКЛАДНОГО ВИРОБУ У РОБОЧОМУ ПРОСТОРИ ПОШАРОВОЇ ПОБУДОВИ

Початкові дані 3D-моделі підготовленої до матеріалізації:

Розміри (LxVxH) - 85,644x65,637x36,802 мм.

Кількість трикутників – 22 860 шт.

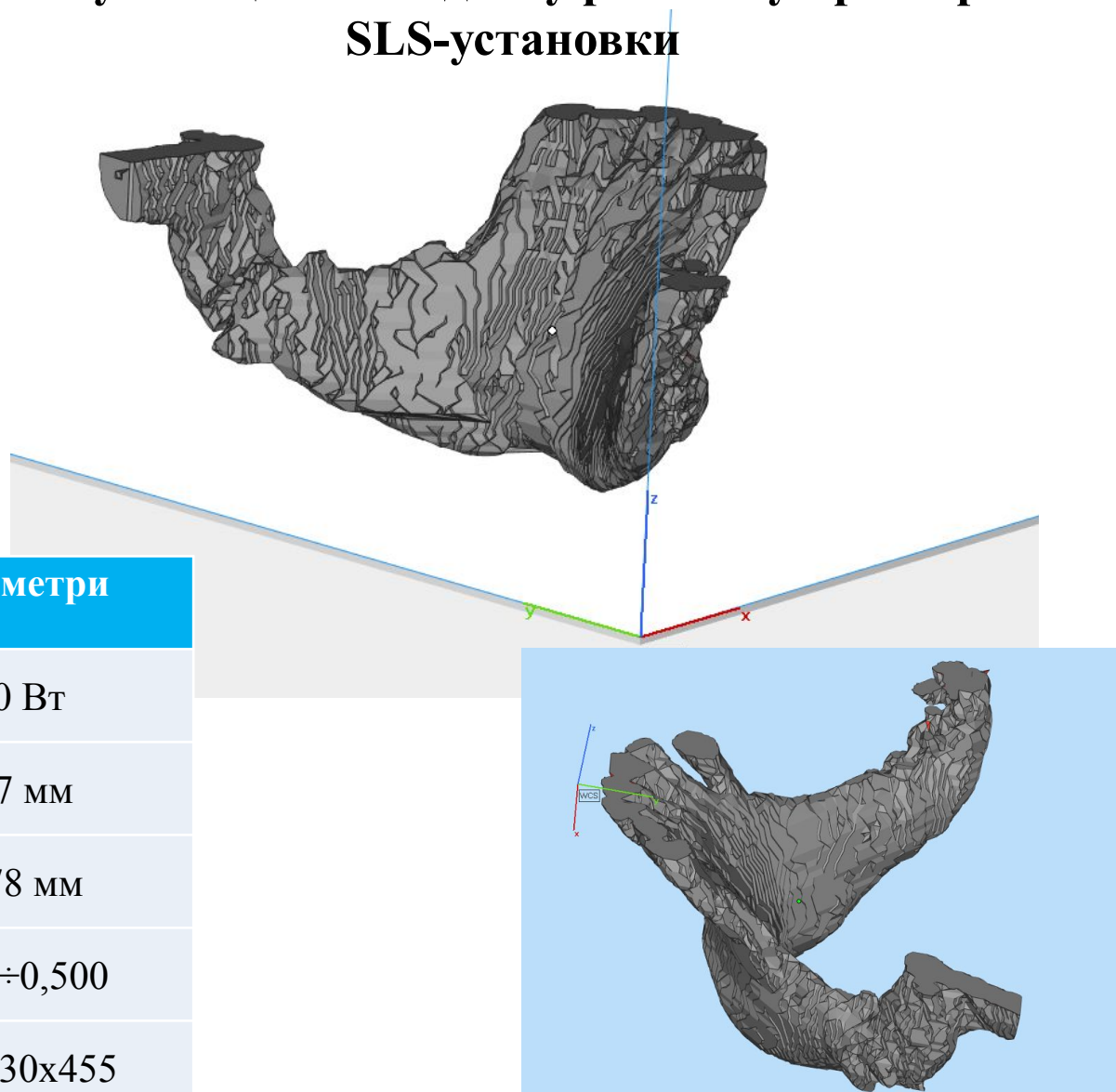
Площа поверхні – 8 508,6 мм².

Об'єм моделі – 15 787,8 мм³.

Основні технічні характеристики установки Vanguard Si2 SLS

| Характеристики | Параметри |
|---|-------------|
| Максимальна потужність лазерної системи CO ₂ | 100 Вт |
| Розмір плями лазерного променя | 0,47 мм |
| Точність побудови за координатними осями X, Y | 0,178 мм |
| Товщина шару побудови, мм | 0,076÷0,500 |
| Розміри робочого простору, мм | 380x330x455 |

Візуалізація 3D-моделі у робочому просторі SLS-установки



ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ ОРІЄНТАЦІЇ ВИРОБІВ

Екранна форма підсистеми кольорової візуалізації та аналізу геометричних характеристик 3D-моделей виробів

Визуальный анализ технологичности изделия

Открыть STL | Импорт STL в БД | Цветовая визуализация модели

Анализ исследуемого признака: Отображение граней модели изделия на сферу | Расчет | Сохранение | PLY

Исходные данные для визуализации

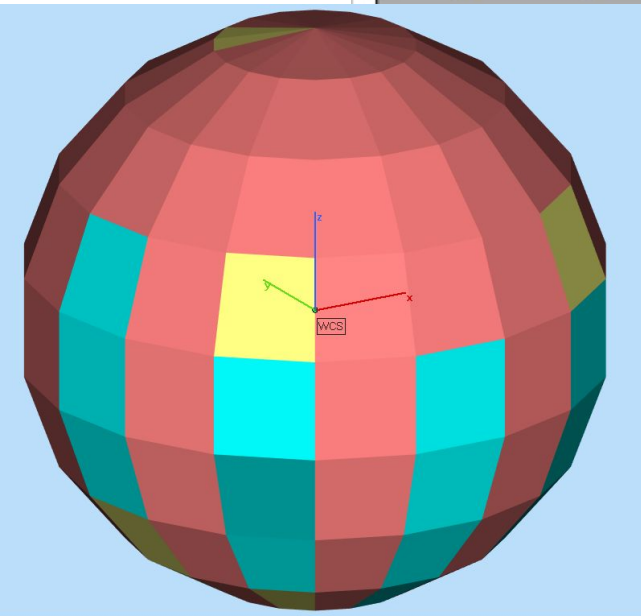
| | | | |
|--------------------------|--------|--|---------|
| Цвет визуализации (RGB1) | R: 0 | G: 0 | B: 0 |
| Цвет визуализации (RGB2) | R: 255 | G: 255 | B: 255 |
| Количество интервалов | 5 | 1,03E03 | 2,05E02 |
| Шаг построения | 0,200 | <input checked="" type="checkbox"/> Площадь граней | |

Цветовая шкала соответствия значениям исследуемого признака

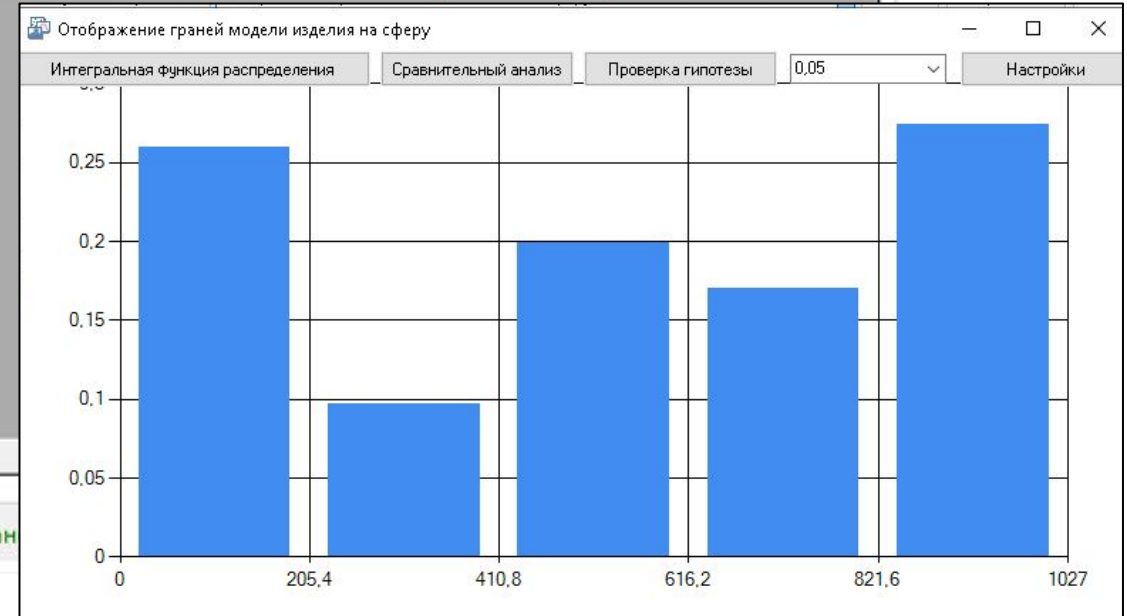
| Начало интервала | R | G | B | H | S | V | Задание цв |
|------------------|-----|-----|-----|-----|---|---------|------------|
| 0 | 255 | 128 | 128 | 0 | 1 | 0,75... | Редактиров |
| 50 | 255 | 255 | 128 | 60 | 1 | 0,75... | Редактиров |
| 100 | 0 | 255 | 255 | 180 | 1 | 0,46... | Редактиров |
| 400 | 0 | 174 | 174 | 180 | 1 | 0,34... | Редактиров |

Варианты визуализации и статистические характеристики распределения исследуемого признака

| XLS | Вариант | Исслед. параметр | Имя файла | Модель | Гистограмма | R1 | G1 | B1 | F |
|-----|---------|---------------------------------------|----------------------------------|----------|-------------|----|----|----|----|
| | 1 | Отображение граней модели изделия ... | C:\Diploma\D201907Ланин\Anal_... | Просмотр | Просмотр | 0 | 0 | 0 | 25 |



Показник ефективності раціональної орієнтації виробу (коефіцієнт концентрації щільності розподілу досліджуваної величини для моделей виробу та сфери

$$K_o = 0,559$$


ПІДСИСТЕМА СТАТИСТИЧНОГО АНАЛІЗУ МНОЖИНИ ВАРІАНТІВ ОРІЄНТАЦІЇ ВИРОБІВ

Ориентация изделия в рабочей области построения

Открыть STL | Импорт STL в БД | Ориентация изделия | Цветовая визуализация модели

Расчет | 81 вариант | Дискретность поворота вокруг оси X: 20 | Y: 20 | Анализ данных

Исходные данные для анализа

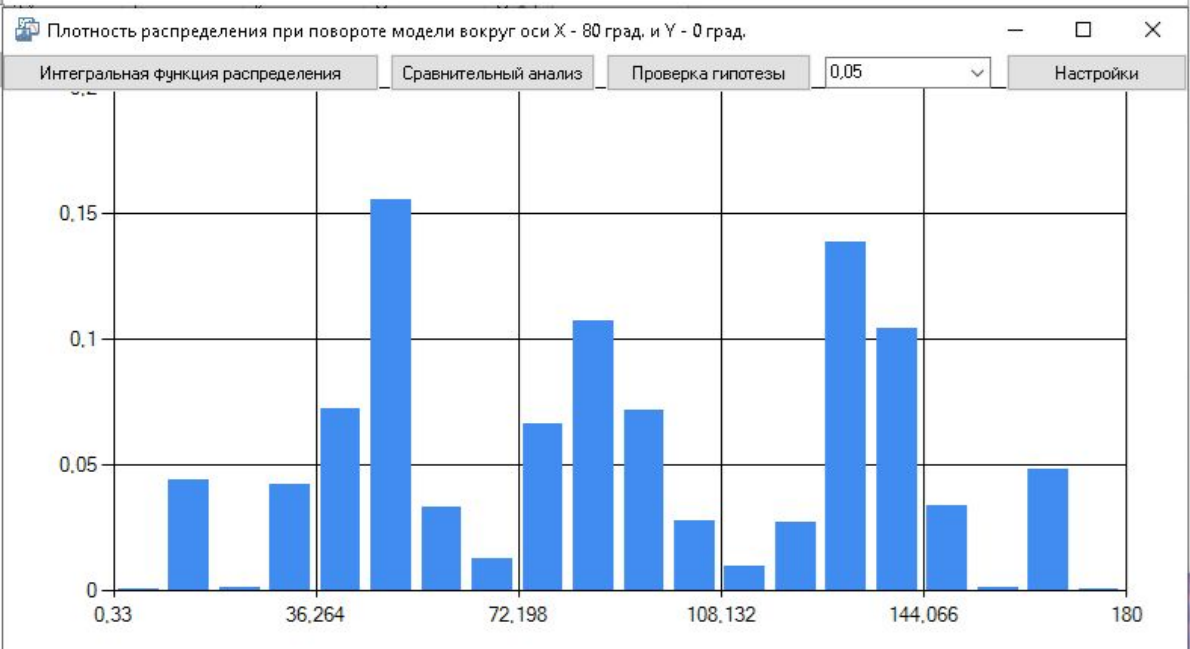
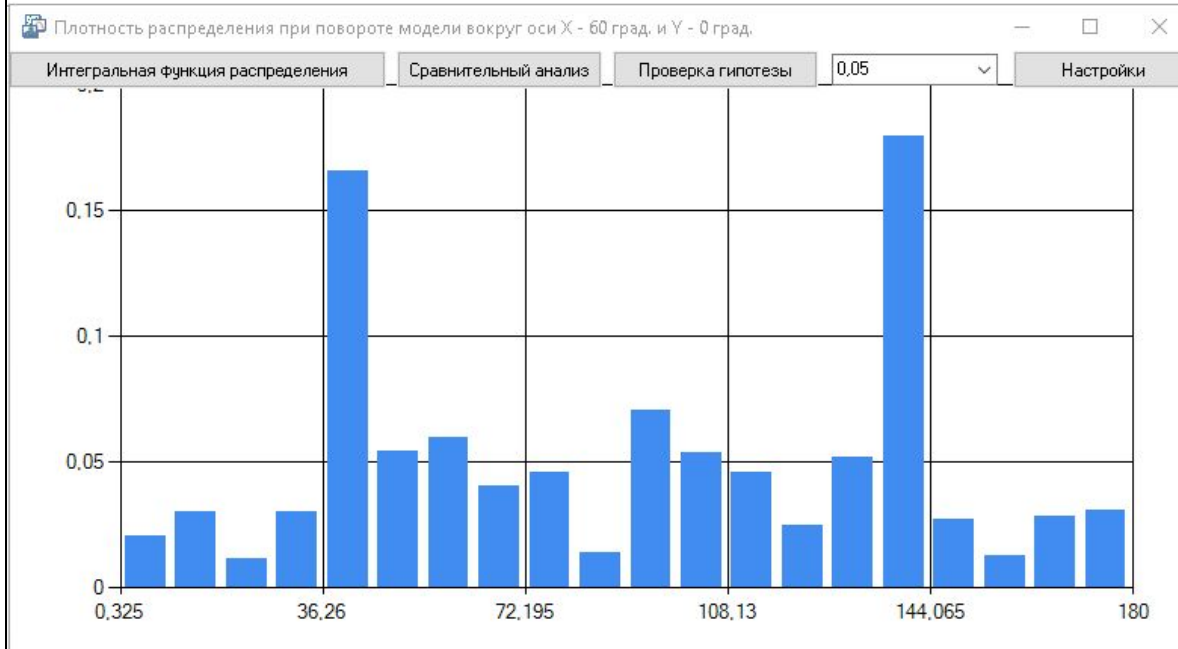
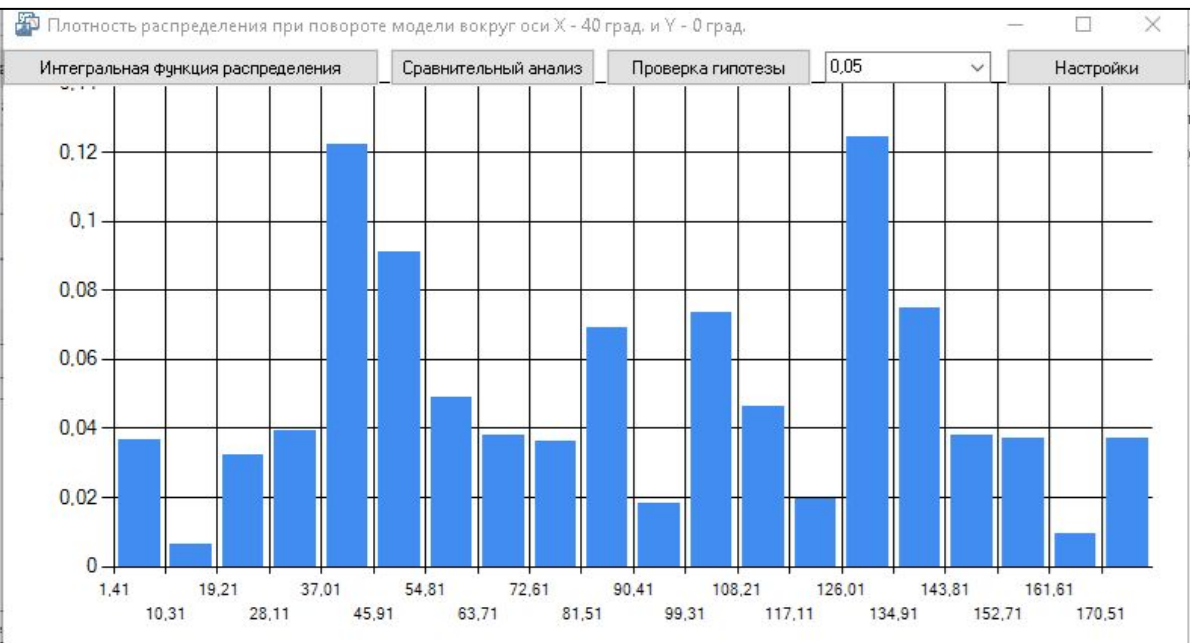
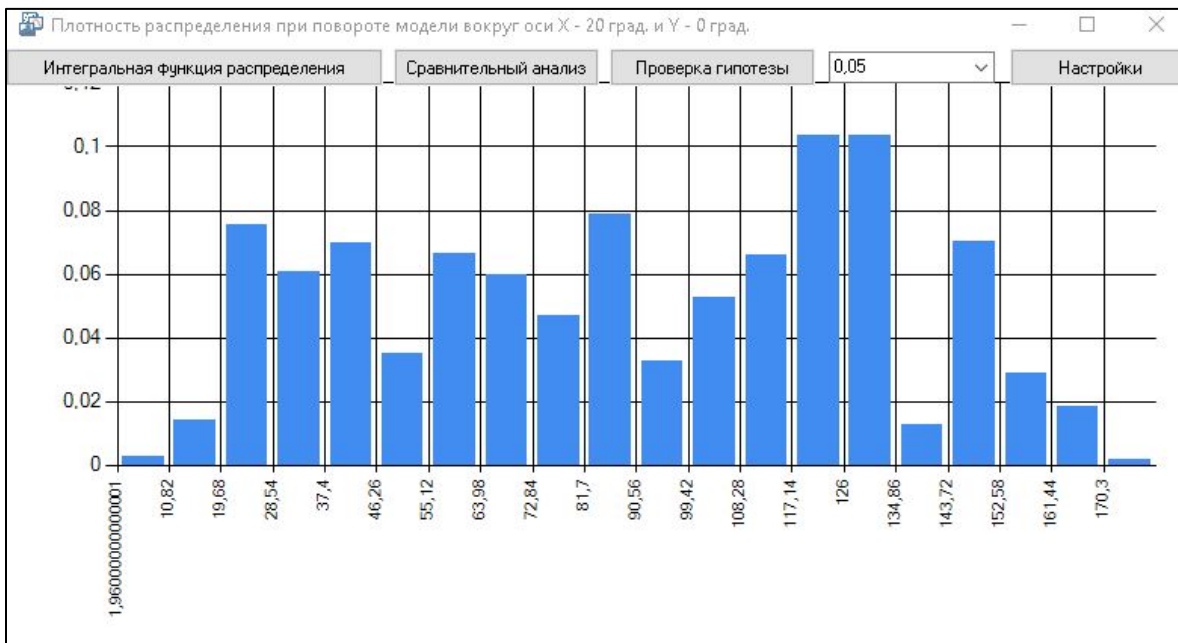
| | R | G | B | Min | Max | Min | Max | | |
|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1-й вариант | 255 | 0 | 0 | 1 | 45 | 0 | 10 | | |
| 2-й вариант | 0 | 255 | 0 | 89 | 91 | 15 | 100 | | |
| 3-й вариант | 128 | 255 | 255 | 136 | 179 | 0 | 10 | | |
| Кол-во интервалов | 20 | 180 | 9,0 | 0 | 50 | <input type="checkbox"/> 1-й | <input type="checkbox"/> 2-й | <input type="checkbox"/> 3-й | <input type="checkbox"/> AND |

Варианты ориентации (статистические характеристики распределения угла наклона вектора нормали относительно оси Z)

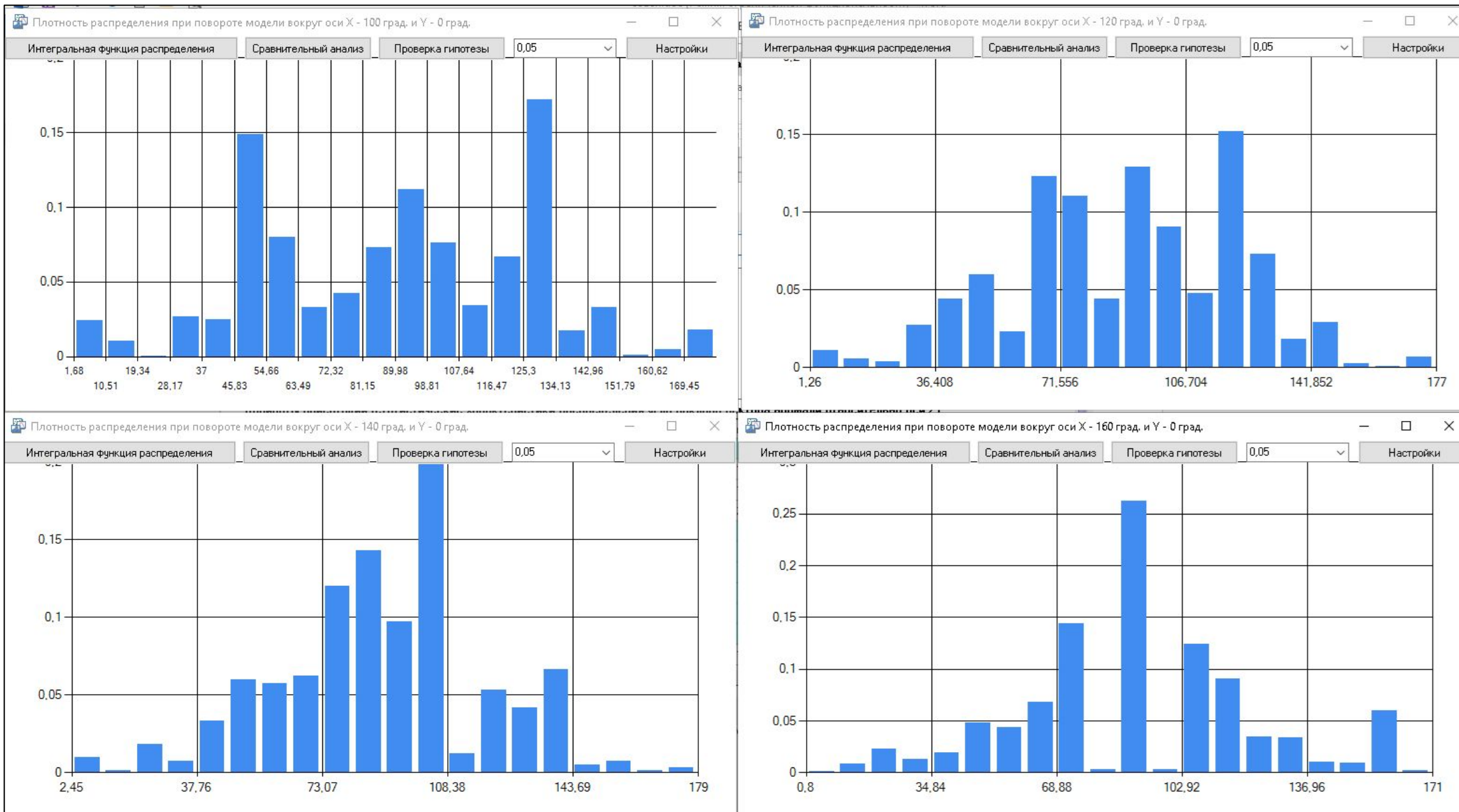
| XLS | № | Высота изделия | Площадь 1-й вар. | Площадь 2-й вар. | Площадь 3-й вар. | Гистограмма | Кол. интерв. | Мин. | M |
|-----|----|----------------|------------------|------------------|------------------|-------------|--------------|----------|---|
| | 1 | 36,80 | 5 % | 17,7 % | 7,1 % | Просмотр | 20 | 0E00 | |
| | 2 | 47,07 | 16 % | 5,8 % | 13,1 % | Просмотр | 20 | 1,96E00 | |
| | 3 | 52,75 | 23,7 % | 5,8 % | 19,6 % | Просмотр | 20 | 1,41E00 | |
| | 4 | 56,84 | 25,9 % | 6,5 % | 27,9 % | Просмотр | 20 | 3,25E-01 | |
| | 5 | 64,64 | 16 % | 5,8 % | 9,7 % | Просмотр | 20 | 3,3E-01 | |
| | 6 | 65,89 | 8,6 % | 6 % | 5,9 % | Просмотр | 20 | 1,68E00 | |
| | 7 | 60,44 | 9,1 % | 8,4 % | 5,7 % | Просмотр | 20 | 1,26E00 | |
| | 8 | 53,74 | 6,9 % | 5,9 % | 8,3 % | Просмотр | 20 | 2,45E00 | |
| | 9 | 45,51 | 6,6 % | 5,8 % | 8 % | Просмотр | 20 | 8E-01 | |
| | 10 | 52,83 | 10,9 % | 4,2 % | 9,7 % | Просмотр | 20 | 8E-01 | |
| | 11 | 57,52 | 19,7 % | 3,5 % | 14,1 % | Просмотр | 20 | 8,77E-01 | |

Анализ выполнен. Время расчета: 0 ч. 0 мин. 34 с. 72 мс.

РЕЗУЛЬТАТИ СТАТИСТИЧНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ МНОЖИНИ ВАРІАНТІВ ОРІЄНТАЦІЇ ВИРОБУ



РЕЗУЛЬТАТИ СТАТИСТИЧНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ МНОЖИНИ ВАРІАНТІВ ОРІЄНТАЦІЇ ВИРОБУ



ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ ОРІЄНТАЦІЇ ВИРОБУ

Результати аналізу розподілу площі поверхонь за кутом нахилу їхніх нормалей щодо напрямку побудови моделі виробу

| № | Висота виробу, мм | Площа поверхонь по інтервалам кутів φ_N | | | Мода кутів φ_N | Кут повороту навколо осі | |
|----|----------------------|---|--------|---------|---------------------------|-----------------------------|----|
| | | 1÷45 | 89÷91 | 136÷179 | | X | Y |
| 1 | 36,80 | 5 % | 17,7 % | 7,1 % | 9,45E01 | 0 | 0 |
| 2 | 47,07 | 16 % | 5,8 % | 13,1 % | 1,3E02 | 20 | 0 |
| 3 | 52,75 | 23,7 % | 5,8 % | 19,6 % | 1,31E02 | 40 | 0 |
| 4 | 56,84 | 25,9 % | 6,5 % | 27,9 % | 1,39E02 | 60 | 0 |
| 5 | 64,64 | 16 % | 5,8 % | 9,7 % | 4,96E01 | 80 | 0 |
| 6 | 65,89 | 8,6 % | 6 % | 5,9 % | 1,3E02 | 100 | 0 |
| 7 | 60,44 | 9,1 % | 8,4 % | 5,7 % | 1,2E02 | 120 | 0 |
| 8 | 53,74 | 6,9 % | 5,9 % | 8,3 % | 1,04E02 | 140 | 0 |
| 9 | 45,51 | 6,6 % | 5,8 % | 8 % | 8,99E01 | 160 | 0 |
| 10 | 52,83 | 10,9 % | 4,2 % | 9,7 % | 9,45E01 | 0 | 20 |
| 11 | 57,52 | 19,7 % | 3,5 % | 14,1 % | 3,21E01 | 20 | 20 |
| 12 | 56,89 | 21,9 % | 0,7 % | 20,5 % | 1,29E02 | 40 | 20 |
| 13 | 56,39 | 18,7 % | 0,2 % | 21,1 % | 5,18E01 | 60 | 20 |
| 14 | 62,62 | 17,3 % | 3,4 % | 16,4 % | 5,11E01 | 80 | 20 |
| 15 | 67,96 | 10 % | 3,6 % | 8,3 % | 1,29E02 | 100 | 20 |

АНАЛІЗ ПРОСТОРОВОГО РОЗПОДІЛУ ВОКСЕЛЬНОЇ 3D-МОДЕЛІ ВИРОБУ

Попередній аналіз 3D-моделі

Створення воксельної 3D-моделі

Збереження воксельної 3D-моделі в ASC-файл

Перевірка адекватності воксельної 3D-моделі

Відхилення воксельної від триангуляційної 3D-моделі

Исходные данные для гистограмм

| | | | |
|----------------|------------------|------------------|------------------|
| Размеры модели | Ось X, мм: 85,64 | Ось Y, мм: 65,64 | Ось Z, мм: 36,80 |
| Колво интерв. | 10 | 10 | 10 |
| Размер интерв. | 8,564 | 6,564 | 3,680 |

Статистические характеристики

| | | | | | | | |
|---------------|-----------|--------------------|-----------|------------------|-----------|----------|-----------|
| Миним. знач. | 0,0000E00 | Дисперсия | 0,0000E00 | Коеф. асимметрии | 0,0000E00 | Середина | 0,0000E00 |
| Максим. знач. | 0,0000E00 | Среднеквадр. откл. | 0,0000E00 | Коеф. эксцесса | 0,0000E00 | Мода | 0,0000E00 |
| Интервал | 0,0000E00 | Среднее арифм. | 0,0000E00 | Коеф. вариации | 0,0000E00 | Медиана | 0,0000E00 |

Выполнена проверка модели.

Екранна форма підсистеми на етапі створення воксельної моделі



Структурная обратимая декомпозиция

Открыть STL | Импортировать STL в БД | Создание воксельной модели | Анализ воксельной модели

Статистический анализ | 1. Воксели модели | ширина (X) | длина (Y) | высота (Z) | XYZ | 3D | Абс. кол-во | Относ. габар. p-ра

Екранна форма статистичного аналізу розподілу елементарних об'ємів виробу

Статистичний аналіз та візуалізація розподілу вокселів виробу за підпросторами



Вибір площини XY, XZ, YZ

Налаштування кольору порожнього і заповненого підпростору

Воксели матеріалу або вільного простору

Гістограма розподілу заповнювання підпросторів

Завдання позиції для третьої координатної осі

Візуалізація заповнювання підпросторів

Количество элементов декомпозиции: 1000; пустых: 658; полных: 0; заполненных на 50...100%: 42.

Гістограму розподілу елементарних об'ємів виробу за підпросторами

Анализ распределения вокселей при объемной декомпозиции

XY | Цвет (Kv=0) | 255 | 255 | 255 | Цвет (Kv=max) | 0 | 0 | 0 | Изделие | Гистограмма

Распределение заполненности материалом изделия по подпространствам

Интегральная функция распределения | Сравнительный анализ | Проверка гипотезы | 0,05 | Настройки

Количество элементов декомпозиции: 1000; пустых: 773; полных: 4; заполненных на 50...100%: 65.

ПІДСИСТЕМА СТАТИСТИЧНОГО АНАЛІЗУ ПОШАРОВОЇ 3D-МОДЕЛІ

Послойный анализ 3D-модели изделия

Открыть STL | Импорт STL в БД | Послойный анализ

Рассекание | Переменный шаг (упрощен) | 0,1 | 0,2 | 0,1 мм | 5 % | Мин. и макс. углы | Цвет | 8,0 | Анализ | Сохранить

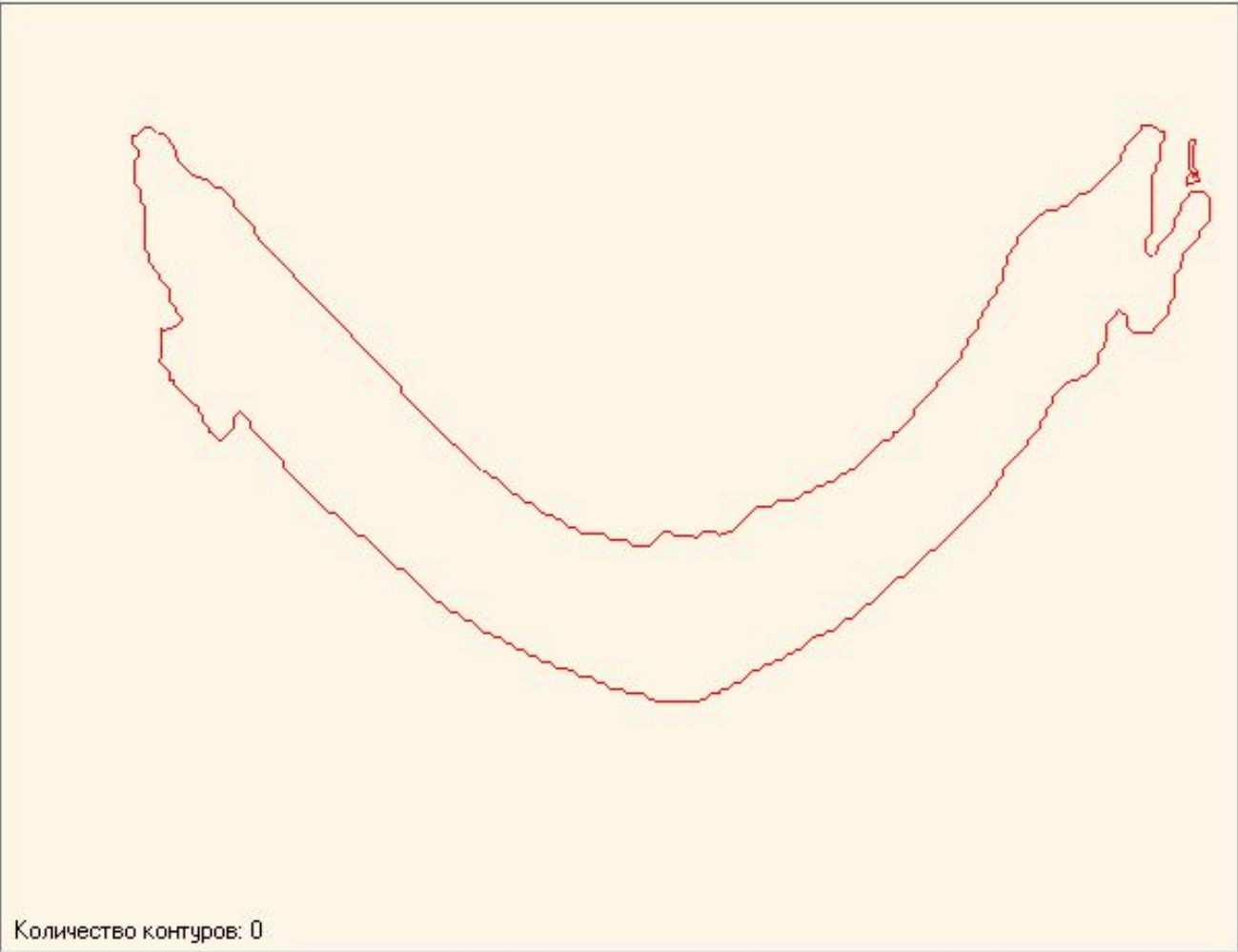
| Номер | h | Z | Периметр | Площ |
|------------|-------------|-------------|--------------|-----------|
| 131 | 0,12 | 30,96 | 220,623 | 6 |
| 132 | 0,12 | 31,08 | 221,062 | 6 |
| 133 | 0,12 | 31,2 | 221,5 | 65 |
| 134 | 0,12 | 31,32 | 221,939 | 6 |
| 135 | 0,12 | 31,44 | 222,378 | 6 |
| 136 | 0,12 | 31,56 | 222,817 | 6 |
| 137 | 0,12 | 31,68 | 223,256 | 6 |
| 138 | 0,12 | 31,8 | 217,526 | 6 |
| 139 | 0,12 | 31,92 | 217,215 | 6 |
| 140 | 0,12 | 32,04 | 216,904 | 6 |
| 141 | 0,12 | 32,16 | 216,592 | 6 |
| 142 | 0,12 | 32,28 | 216,281 | 6 |

Не показывать контур Анализ погрешности
 Отображать один слой Фрактальный анализ
 Относит. значения Клеточный метод
 Визуализация фрактального анализа

5,00 | 2 | 1

Кол-во интервалов гистограммы | 20

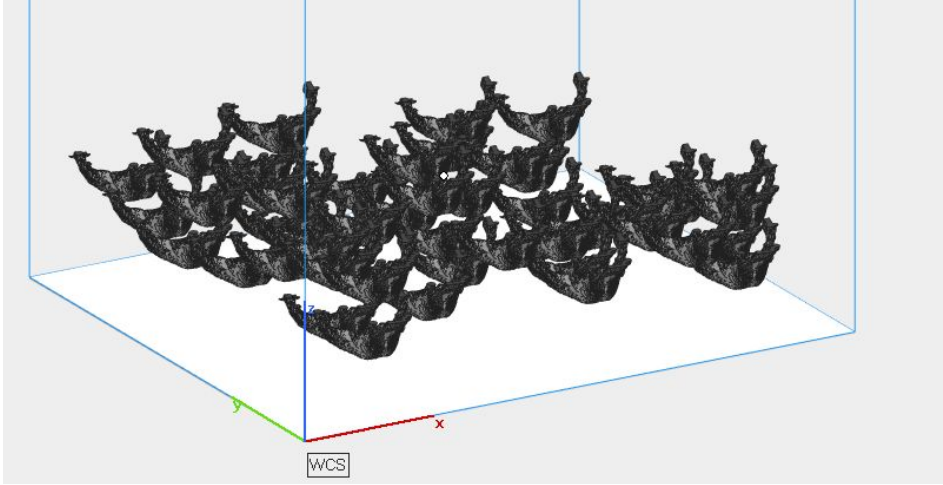
Количество контуров: 0



Данные по сечениям готовы. Время создания: 00:00:17.12

СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК РОБОЧОГО ПРОСТОРУ ПОШАРОВОЇ ПОБУДОВИ

Візуалізація варіанту розміщення 50-ти моделей виробу з використанням генетичного алгоритму

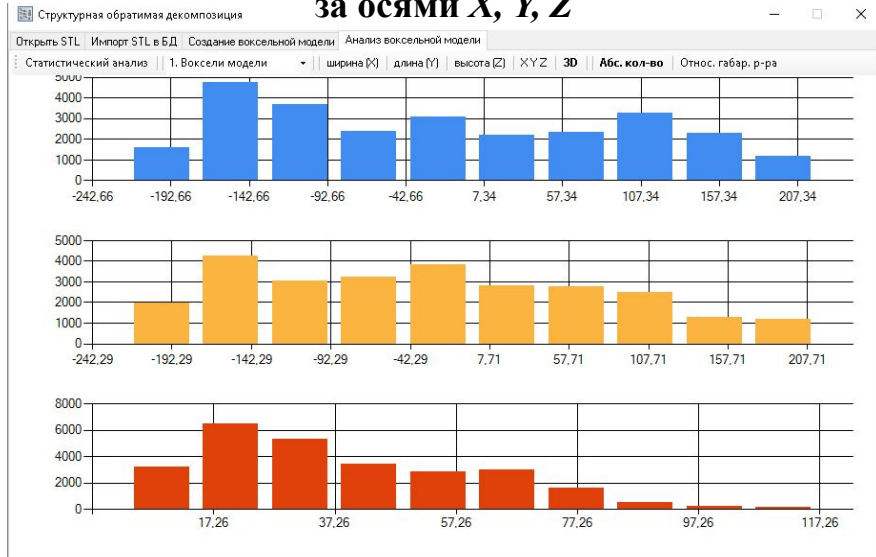


Розподіл матеріалу виробів за підпросторами



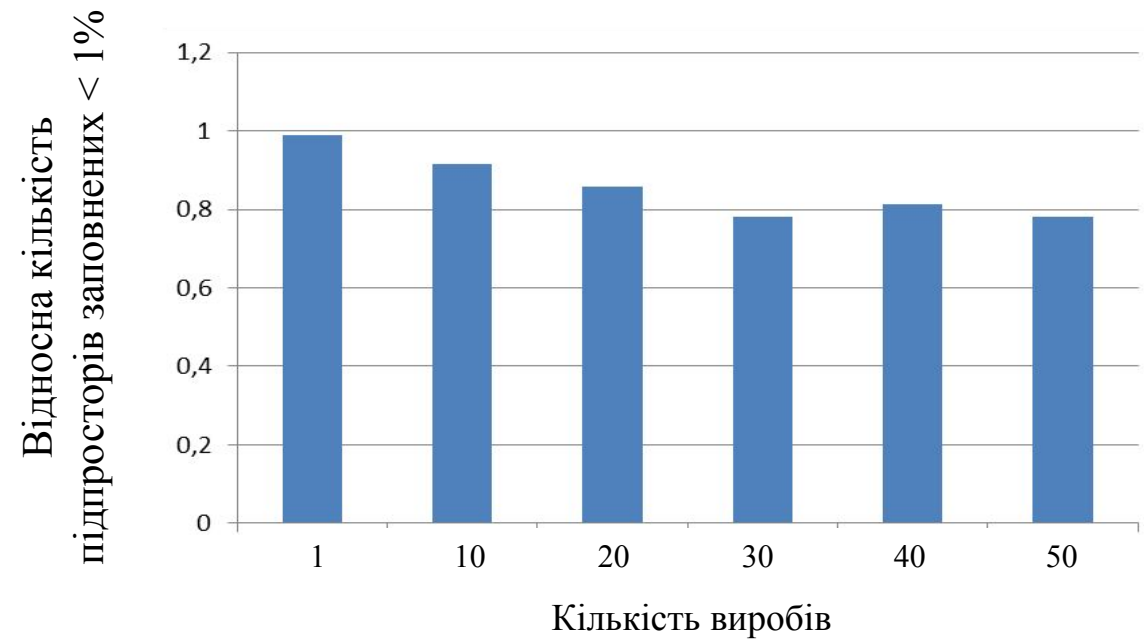
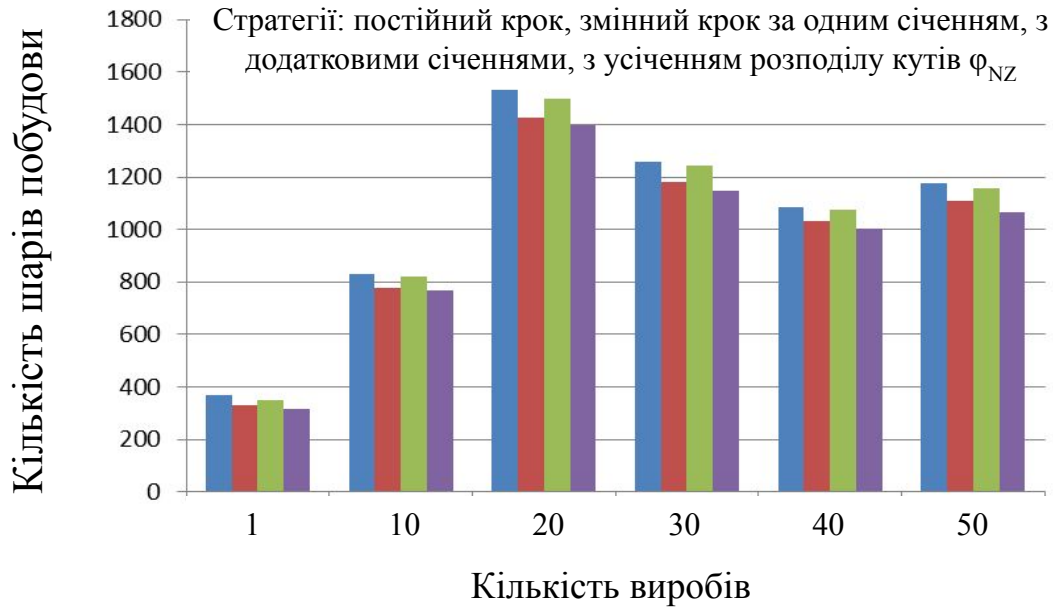
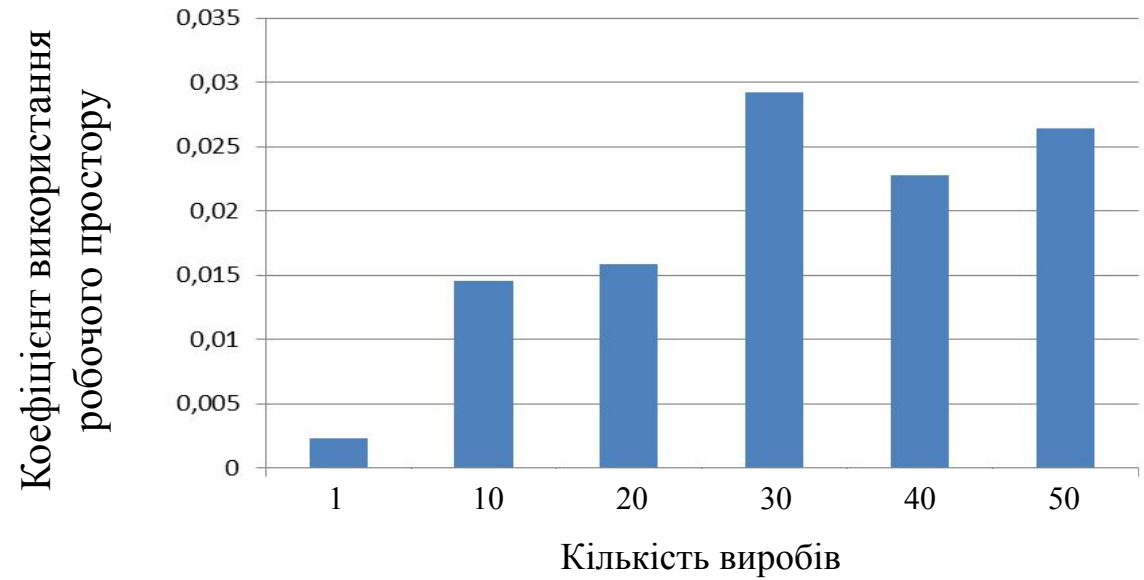
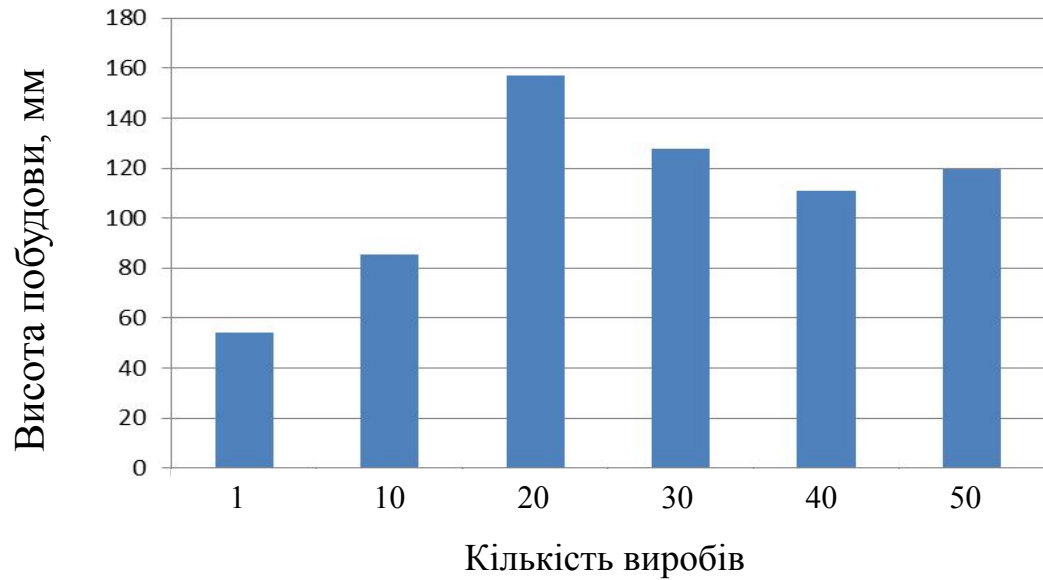
Порівняльний аналіз характеристик робочого простору

Аналіз розподілу матеріалу у робочому просторі за осями X, Y, Z



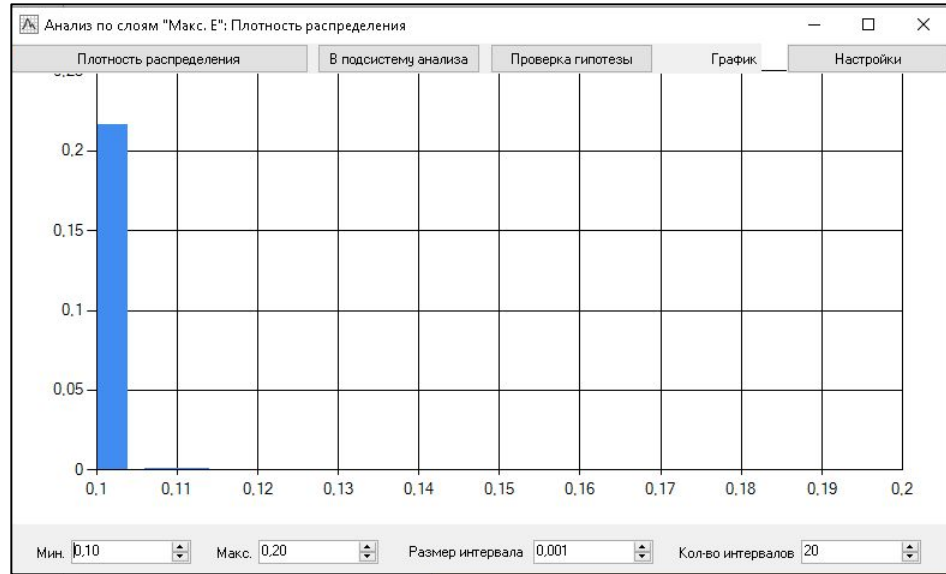
| Характеристика робочого простору | Кількість екземплярів у групі виробів | | | | | |
|---|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| Висота побудови, мм | 54,04 | 85,43 | 156,79 | 127,73 | 110,71 | 119,63 |
| Коефіцієнт використання робочого простору за кількістю підпросторів заповнених < 1% | 0,0023 | 0,0146 | 0,0159 | 0,0292 | 0,0228 | 0,0264 |
| кількість шарів побудови стратегія constant | 369 | 828 | 1532 | 1256 | 1086 | 1175 |
| стратегія simpleVariable | 331 | 777 | 1425 | 1180 | 1033 | 1109 |
| стратегія variableNoTrim | 349 | 820 | 1497 | 1242 | 1075 | 1157 |
| стратегія variableTrim | 317 | 768 | 1396 | 1146 | 1002 | 1066 |

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВАРІАНТІВ РОЗМІЩЕННЯ ЗА ОКРЕМИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ РОБОЧОГО ПРОСТОРУ ПОШАРОВОЇ ПОБУДОВИ

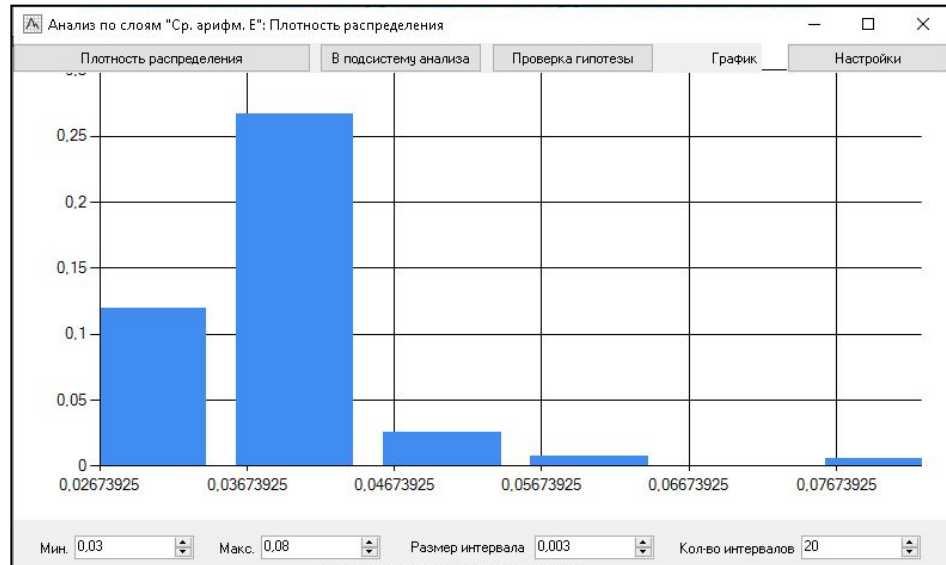


СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ РОЗПОДІЛУ ВІДХИЛЕНЬ ВІД ПРАВИЛЬНОЇ ФОРМИ ПОВЕРХОНЬ ЗА ШАРАМИ ПОБУДОВИ 3D МОДЕЛЕЙ ВИРОБІВ

Щільності розподілу

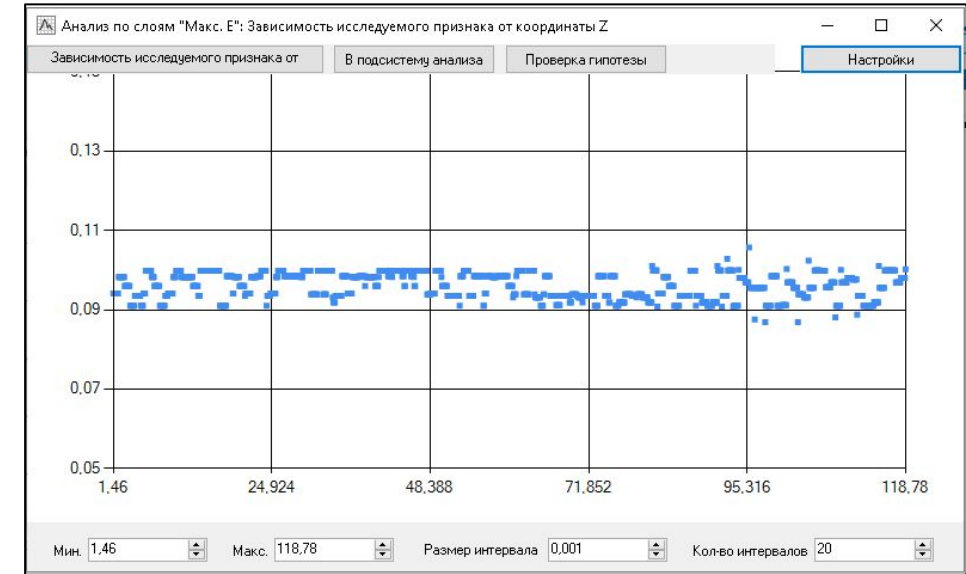


**Максимальна
величина відхилення
від правильної форми**



**Средньоарифметична
величина відхилення
від правильної форми**

Залежності від координат площин перетинів по осі Z



Параметри пошарової побудови $h_{\min} = 0.1$ мм, $h_{\max} = 0.2$ мм, $\Delta_{\max} = 0.1$ мм, $\Delta_{\text{cut}} = 5\%$

Дякую за увагу!