



Прийнято 27.03.2026. Прорецензовано 25.05.2026. Опубліковано 29.05.2026.

УДК 621.01; 004.42

DOI: 10.31471/1993-9965-2026-1(60)-61-73

## **ЗАСТОСУВАННЯ SOLIDWORKS У ПРОЦЕСІ СТАТИЧНОГО БАЛАНСУВАННЯ ПІД ЧАС ПРОЄКТУВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КОНСТРУКЦІЇ КОЛІНЧАСТОГО ВАЛА**

**Гордєєв А. І. \***

Доктор технічних наук, професор, Заслужений винахідник України  
Хмельницький національний університет  
29000, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 11  
<https://orcid.org/0000-0003-4494-4348>  
e-mail: aigordeev54@ukr.net

**Костюк Н. О.**

Доктор філософії, доцент  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу  
76019, Івано-Франківськ, вул. Карпатська 15  
<https://orcid.org/0000-0001-6223-6412>  
e-mail: nazkost92@gmail.com

**Гороховський В. О.**

Аспірант  
Хмельницький національний університет  
29000, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 11  
<https://orcid.org/0009-0002-0676-0038>  
e-mail: Sertgoroh@gmail.com

**Анотація.** В роботі розглянуто вирішення актуальної науково-технічної задачі, а саме створення методології статичного балансування складних систем, що обертаються на прикладі процесу проектування конструктивних параметрів колінчастих валів із допомогою програмного продукту SolidWorks, що дає можливість прискорити процес статичного балансування ще в процесі проектування, підвищує точність процесу та зменшує час на проведення остаточних експериментальних досліджень по вибору маси та місця прикладення противаги. Запропоновано послідовність виконання дій при реалізації методології статичного балансування колінчастого вала в процесі проектування. Проведено графічну візуалізацію у SolidWorks Motion траєкторії руху центральної точки діаметра корінної шийки колінчастого вала при обертанні, як незбалансованого, так і збалансованого. З отриманої траєкторії руху центральної точки діаметра корінної шийки незбалансованого колінчастого вала встановлено, що биття у крайніх точках становить 0,103 мм., що свідчить про необхідність встановлення противаги для усунення дисбалансу. Для підвищення точності та швидкості процесу балансування колінчастого вала в середовищі SolidWorks розроблено спеціальний макрос, який автоматизує основні етапи визначення маси та розташування противаги. Програма автоматично зчитує масові характеристики деталі, визначає зміщення центра мас відносно осі обертання, розраховує необхідну масу противаги, формує ескіз її геометрії та створює тривимірну модель противаги з передбаченими конструктивними елементами

Запропоноване посилання: Гордєєв, А. І., Костюк, Н. О. & Гороховський, В. О. (2026). Застосування SolidWorks у процесі статичного балансування під час проектування геометричних параметрів конструкції колінчастого вала. Науковий вісник ІФНТУНГ, 1(60), 61-73. doi: 10.31471/1993-9965-2026-1(60)-61-73

\* Відповідальний автор



кріплення. Це дає змогу отримати остаточно статично збалансовану модель колінчастого вала, готову до подальшого аналізу або виготовлення.

**Ключові слова:** статичне балансування, колінчастий вал, SolidWorks, SolidWorks Motion, автоматизація проектування, CAD-моделювання, дисбаланс, центр мас, противага, геометричні параметри, макроси SolidWorks, тривимірне моделювання, інженерний аналіз, динаміка обертових систем, машинобудування, комп'ютерне моделювання, оптимізація конструкції, вібрації, проектування колінчастих валів, балансування обертових систем.

### Вступ

Обертальний рух є одним із найпоширеніших і ключових у сучасній техніці. У рамках цього типу руху завжди діють сили інерції, що виникають через неминуче прискорення обертання компонентів машин. Такі елементи, як шківни, маховики, дробарки, центрифуги, сепаратори тощо, які мають значну вагу та габарити і обертаються на великих швидкостях, потребують ретельного балансування. Це дозволяє запобігти биттю, вібраціям, які виникають через несумісність маси з віссю обертання, а також зменшити навантаження на опорні конструкції. Для досягнення належного балансування обертального тіла необхідно дотримуватися двох основних умов: центр мас повинен розташовуватися на геометричній осі обертання, а сама вісь обертання має збігатися з головною віссю інерції.

### Аналіз сучасних досліджень

Задачі аналізу визначення координат центру ваги, кінематики та динаміки багато масових і багато тільних систем є одним із класичних напрямків у галузі прикладної механіки. Значний розвиток теоретичних основ та практичних рішень у напрямку математичного моделювання і оптимізаційних методів геометричного проектування та оптимізаційних задач балансної компоновки створили вітчизняні науковці [1-18] та зарубіжні автори [19-26]. Одна науково-технічна задача, а саме визначення положення координат центра ваги колісного транспортного засобу для аналізу його руху по складних траєкторіях знаходить багато технічних рішень [27-29].

Аналіз наукової літератури показав, що існує широкий клас задач в яких необхідно враховувати просторові форми об'єктів, визначити масу та координати центру ваги та відстані їх у горизонтальних або вертикальних площинах. У вітчизняній науці основні результати в напрямку математичного та програмного забезпечення задач геометричного проектування були досягнуті в науковій школі Ю. Г. Стояна [1- 2]. Значний внесок у розвиток теорій і методів розв'язання складних задач компоновки систем з урахуванням просторової геометрії об'єктів зробили М. І. Гіль,

І. В. Гребенник, О. М. Кисельова, В. М. Комяк, О. В. Панкратов [30-34]. Закордонні дослідження з цього напрямку були виконані авторами: J. Bennell, C. Che, Y. Chen, G. Fasano, L. Y. Wang [35-36]. Також у щорічних монографіях серії «Springer Optimization and Its Applications» [37-38] особлива увага приділяється моделям, методам та інформаційним технологіям компоувального синтезу об'єктів аерокосмічної техніки з визначення маси та розташування координат центру ваги [45].

Для вирішення завдання визначення координат центру ваги та маси плаского або двомірного об'єкта, який описується простими фігурами, застосовують аналітичні або графічні методи теоретичної механіки [39-42, 45].

Розробка сучасних інформаційних систем для розв'язання задач синтезу оптимальних конфігурацій складних просторових об'єктів потребує автоматичного побудування математичних моделей. При цьому процес комп'ютерного моделювання, що включає трансформацію геометричної інформації та візуалізацію отриманих результатів, має творчий характер і є одним із найскладніших і найвідповідальніших етапів. Цей процес безпосередньо пов'язаний зі створенням інформаційної технології, яка базується на інформаційно-аналітичних та об'єктно-орієнтованих моделях предметної області й вимагає розробки ефективних методів оптимізації рішень. Для кінематичного та динамічного аналізу складних багатомасових об'єктів існують спеціалізовані програми: CarSim, Adams Car, Simpack. Ці програми дозволяють інженерам та дослідникам вивчати поведінку транспортних та механічних систем у різних ситуаціях та оцінювати їх стійкість та безпеку. Вони застосовується в різних галузях, включаючи машинобудування, автомобільну промисловість, залізничний транспорт, авіацію, будівництво та багато інших [45].

Однак висока вартість придбання ліцензії на використання вище наведених програмних продуктів, а також непотрібність усіх додаткових функцій програм для розв'язання поставленого завдання, дають можливість скористатися програмним продуктом SolidWorks для аналізу кінематики та динаміки багатомасових і багатотільних систем [45].

### Постановка завдання

Розроблення методології статичного балансування складних систем, що обертаються, а саме процесу проектування колінчастих валів за допомогою програмного продукту SolidWorks є актуальною науково-технічною задачею, вирішення якої дасть можливість прискорити процес статичного балансування ще на етапі проектування, підвищить точність процесу та зменшить час на проведення остаточних експериментальних досліджень по виборі маси та місця прикладення противаги.

### Виклад основного матеріалу (Результати та їх обговорення)

Існує велика кількість конструктивних виконань компресорів: одноступеневі та багатоступеневі, з одностороннім або двостороннім всмоктуванням, сальникові та безсальникові агрегати тощо. У тракторній техніці зазвичай застосовується стандартний компресорний вузол — одноступеневий поршневий компресор з одним циліндром. Привід такого компресора здійснюється через додаткову шестерню, яка взаємодіє із шестернею, встановленою на колінчастому валі компресора.

Водночас особливості конструкції зумовлюють роботу, пов'язану з обертанням складної за геометрією деталі — колінчастого вала, який за один оберт двічі проходить крайні положення кривошипно-шатунного механізму. За відсутності якісного статичного та динамічного балансування в цих положеннях виникають додаткові інерційні сили, що призводять до підвищення рівня шуму, ударних навантажень і прискореного зношування корінних шийок.

У зв'язку з цим конструкція колінчастого вала потребує обов'язкового балансування, яке на етапі проектування враховується в кресленнях, а надалі уточнюється експериментально шляхом встановлення противаг або видалення шару металу з визначених зон деталі [43, 44].

Центр ваги тіла — незмінно зв'язана з цим тілом геометрична точка, в якій прикладена рівнодійна сил ваги окремих часток тіла, тобто вага тіла в просторі [45].

Вагу тіла  $G$  можна записати, як рівнодійну сил ваги  $\Delta G_n$  окремих часток тіла  $n$ , яка дорівнює їх сумі [45]:

$$G = \sum_{n=1}^k \Delta G_n, \quad (1)$$

де  $n$  — частка тіла;

$G_n$  — сила ваги частки, прикладена в токах  $A_1, A_2, A_3$ .

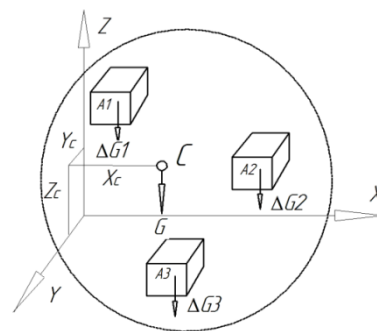


Рисунок 1 – Схема визначення центра ваги тіла

Координати центра ваги визначаються аналогічно координатам центра паралельних сил  $C(X_c, Y_c, Z_c)$  складених силами ваги часток тіла  $\Delta G_1, \Delta G_2, \dots, \Delta G_n$  [45]:

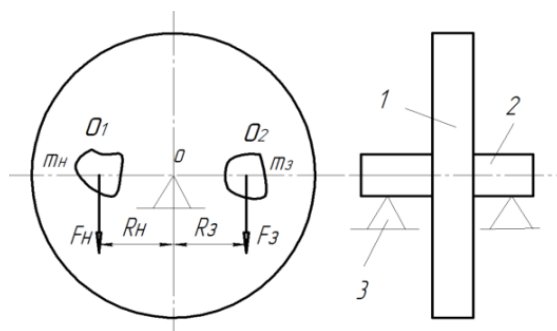
$$X_c = \frac{\sum_{n=1}^k (\Delta G_n \cdot x_n)}{G}, \quad Y_c = \frac{\sum_{n=1}^k (\Delta G_n \cdot y_n)}{G}, \quad (2)$$

$$Z_c = \frac{\sum_{n=1}^k (\Delta G_n \cdot z_n)}{G},$$

де  $G = \sum_{n=1}^k \Delta G_n$  — вага тіла;

$X_n, Y_n, Z_n$  — відповідні координати точок прикладання  $A_1, A_2, A_3$  сил ваги часток тіла.

Статична невірноваженість деталі — це незбігання її центра тяжіння з віссю обертання. Наприклад, якщо до ідеально (теоретично) зрівноваженого тіла (рис. 2) на відстані  $R_H$  від центра обертання  $O$  прикріпити тягарець масою  $F_H$ , то центр тяжіння його зміститься у бік вантажу [45].



1 — деталь; 2 — оправка; 3 — опора

Рисунок 2 – Схема зрівноваження деталей під час статичного балансування

У цьому випадку деталь знаходиться в умовах рівноваги, яке описується рівнянням:

$$\sum M_o = F_H \cdot R_H - F_3 \cdot R_3 = 0, \quad (3)$$

де  $F_H$  – маса тягарця, що створює незрівноваження;

$F_3$  – маса тягарця, що створює зрівноваження;

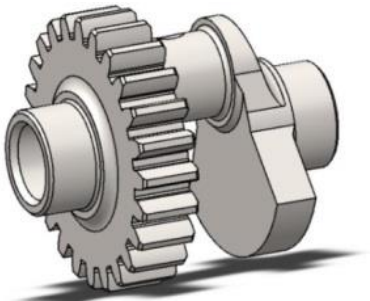
$R_3$  – відстань від геометричного центру до тягарця, що створює зрівноваження

$R_H$  – відстань від геометричного центру до тягарця, що створює незрівноваження.

З рівняння 3 можна визначити масу тягарця, що створює зрівноваження за формулою:

$$F_3 = F_H \frac{R_H}{R_3}. \quad (4)$$

У дослідженні було проаналізовано заводське робоче креслення колінчастого валу та побудовано зображення 3D-моделі колінчастого валу (рис. 3).



**Рисунок 3 – Графічне зображення 3D-моделі колінчастого валу**

Сучасні CAD-системи, зокрема SolidWorks, надають можливість інтегрувати розрахунки масових характеристик та центру мас безпосередньо у цифрову модель деталі або збірки. Це дозволяє виконувати попереднє проектування противаг і оцінку балансування ще на стадії моделювання, що підвищує точність і ефективність проектних робіт.

Для автоматизації процесу балансування широко використовуються VBA-макроси (Visual Basic for Applications). Програмування таких макросів передбачає написання коду, який здатен: визначити центр мас деталі або збірки, обчислювати зміщення від осі обертання, розраховувати масу та розміри противаги, а також автоматично генерувати її 3D-модель з необхідними кріпленнями. Використання програмування дозволяє значно скоротити час проектування, підвищити точність розрахунків, мінімізувати людський фактор і інтегрувати результати безпосередньо в цифрову модель виробу. У сучасному машинобудуванні процеси проектування та виготовлення деталей і збірок дедалі більше інтегруються із цифровими технологіями, що дозволяє підвищувати точ-

ність, ефективність і надійність виробничих систем. Одним із ключових напрямів у цьому контексті є інтеграція процесу балансування у CAD-середовище, таке як SolidWorks, що забезпечує комплексний підхід до аналізу і оптимізації механічних характеристик деталей і збірок ще на етапі проектування.

Використання програмування та написання макросів на мові VBA дозволяє створювати універсальні алгоритми, здатні самостійно аналізувати масові характеристики моделі, визначати параметри противаг і автоматично інтегрувати їх у збірку. Такий підхід забезпечує повторюваність і стандартизацію процесу балансування, що є особливо важливим при проектуванні високоточних верстатних пристроїв та складних технологічних вузлів, де навіть незначні відхилення можуть призводити до критичного зниження якості обробки.

Запропонована методологія статичного балансування колінчастого валу у SolidWorks показана на рис. 4.

Завдяки такій структурі процес балансування набуває властивостей повної повторюваності, стандартизації та не залежить від рівня досвіду конкретного конструктора. Розроблений алгоритм може бути інтегрований у цифровий виробничий ланцюг «CAD–CAM–CAE».

Відповідно до пунктів 1–3 методології отримано 3D-модель колінчастого валу з позначеним центром мас (рис. 5), а також визначено його масові характеристики та координати центру ваги.

З рисунка 6, що відображає результати розрахунків, видно наявність зміщення координат центру мас від геометричної осі деталі вздовж осей:  $Y = 0,41$  мм та по  $Z = -0,02$  мм. Відповідно колінчастий вал потребує статичного балансування.

У подальших дослідженнях у середовищі SolidWorks Motion виконано графічну візуалізацію траєкторії руху центральної точки діаметра корінної шийки колінчастого валу за частоти обертання 1500 об/хв. (рис. 7).

З отриманої траєкторії руху (рис. 8) центральної точки діаметра корінної шийки незбалансованого колінчастого валу встановлено, що величина биття в крайніх положеннях становить 0,103 мм, що свідчить про необхідність встановлення противаг для усунення дисбалансу.

Для підвищення точності та швидкості процесу балансування колінчастого валу в середовищі SolidWorks розроблено спеціальний макрос (рис. 9), який автоматизує основні етапи визначення маси та розташування противаги.

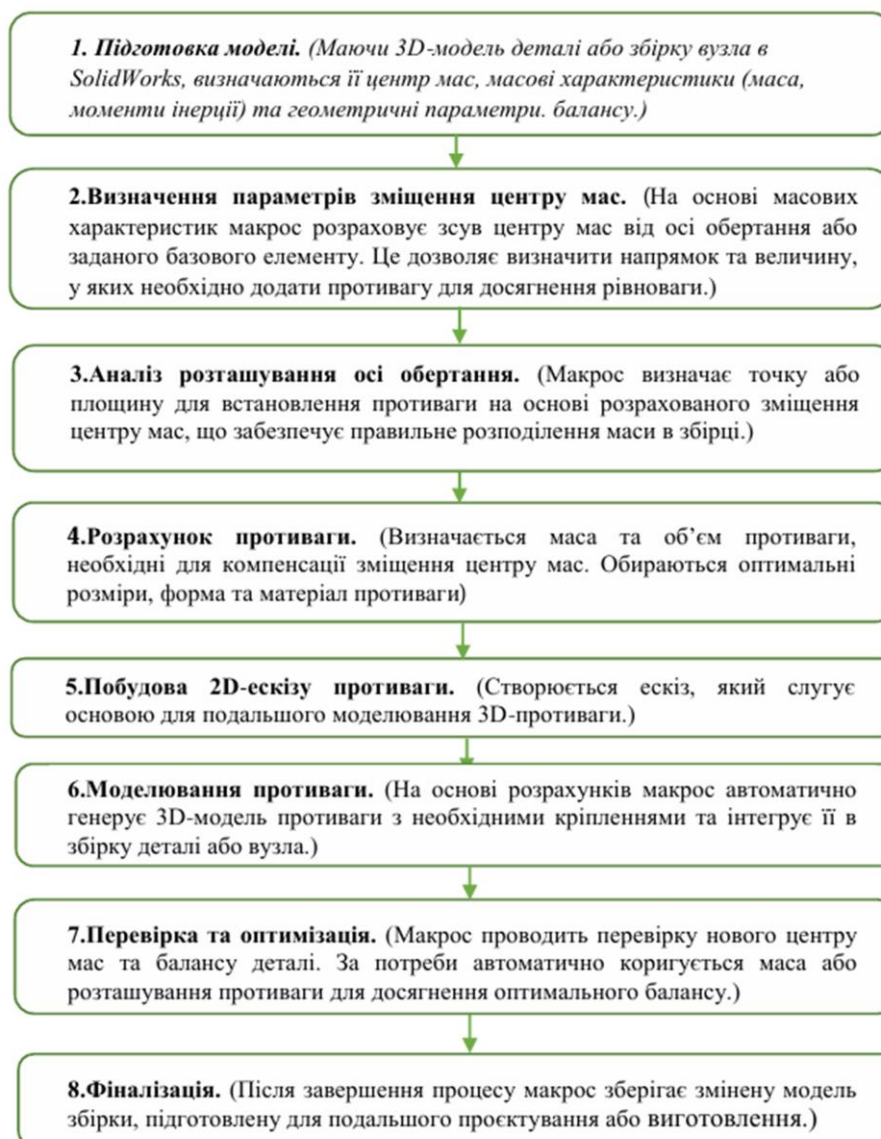


Рисунок 4 – Методика автоматизованого балансування деталей і складальних одиниць у SolidWorks із використанням VBA-макросів

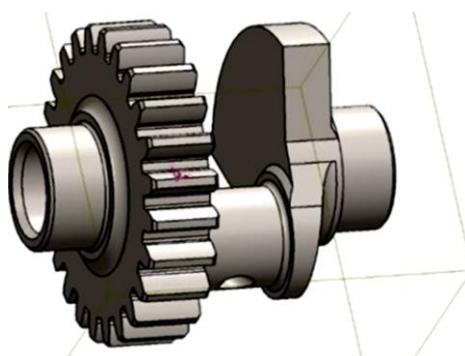


Рисунок 5 – Графічне зображення 3D-моделі колінчастого вала з вказаним центром ваги

Макрос, реалізований у середовищі VBA (Visual Basic for Applications) і вбудований у SolidWorks, надає безпосередній доступ до параметричних даних тривимірної моделі.

Важливою особливістю розробленого макроса є впорядкована організація виклику функцій із використанням класової структури (рис. 10). У межах програмної реалізації створено три базові класи:

Mass characteristics: Assembly1  
 Configuration: Default  
 Coordinate system: Coordinate system 2  
 Mass = 1550.80 grams  
 Volume = 199333.87 cubic millimeters  
 Surface area = 39431.41 square millimeters  
 Center of gravity : (millimeters)  
 X = -59.88  
 Y = 0.41  
 Z = -0.02

Principal axes of inertia and principal moments of inertia: ( grams \* square millimeters )  
 Center of gravity  
 $I_x = ( 0.98, 0.18, 0.00) P_x = 1087455.48$   
 $I_y = (-0.18, 0.98, 0.00) P_y = 1554647.38$   
 $I_z = ( 0.00, 0.00, 1.00) P_z = 1672697.44$   
 Moments of Inertia: ( grams \* square millimeters)  
 Determined at the center of gravity and aligned with respect to the output coordinate system.  
 $L_{xx} = 1101943.28 L_{xy} = 80985.72 L_{xz} = -43.67$   
 $L_{yx} = 80985.72 L_{yy} = 1540159.79 L_{yz} = 149.08$   
 $L_{zx} = -43.67 L_{zy} = 149.08 L_{zz} = 1672697.24$

Рисунок 6 – Результати визначення маси та координат центру ваги колінчастого валу без противаги в середовищі SolidWorks

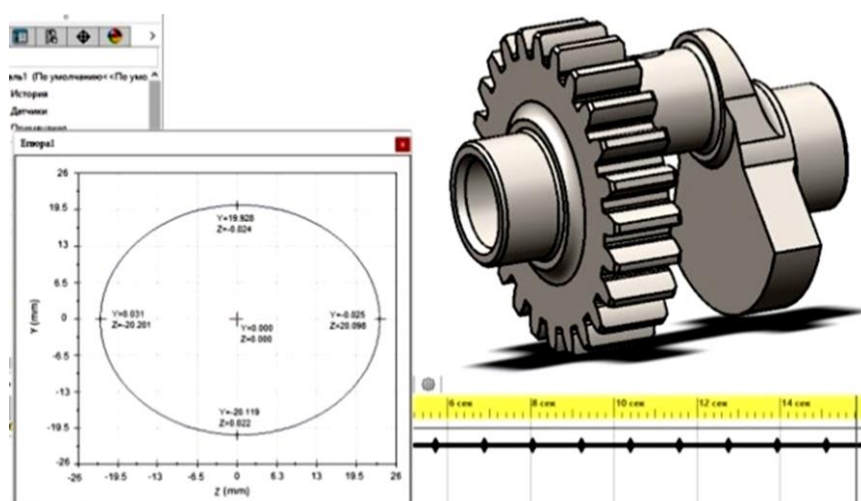


Рисунок 7 – Графічне відображення в SolidWorks Motion траєкторії руху центральної точки діаметра корінної шийки колінчастого валу за частоти обертання 1500 об/хв

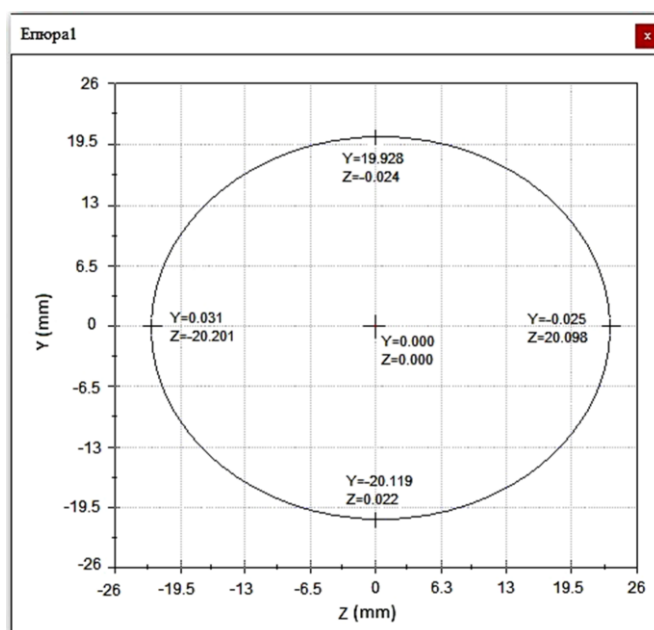


Рисунок 8 – Траєкторія руху центральної точки діаметра корінної шийки незбалансованого колінчастого валу за частоти обертання 1500 об/хв

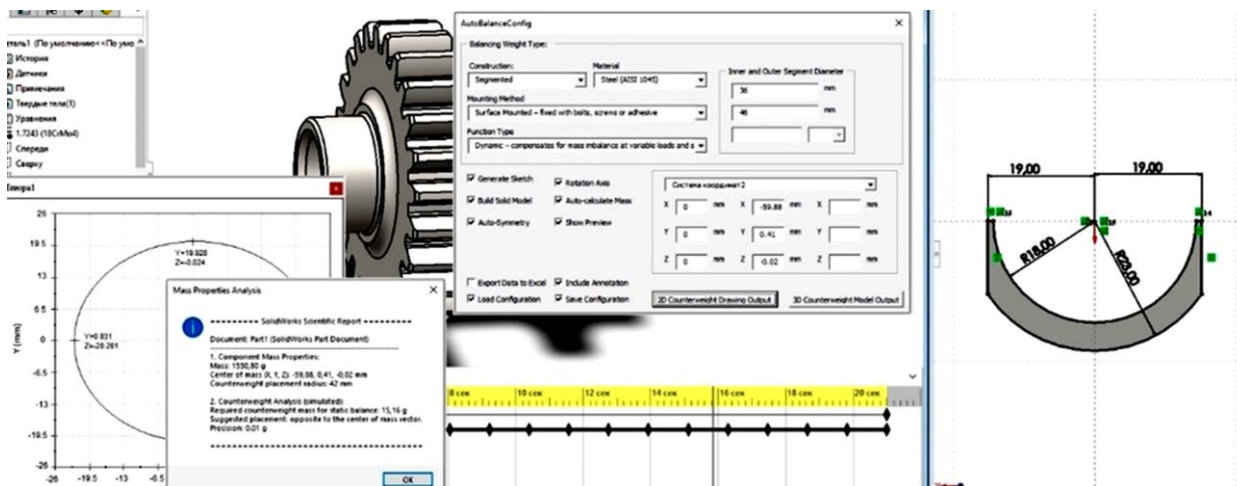


Рисунок 9 – Графічна візуалізація розрахунку маси противаги та створення ескізу противаги в середовищі SolidWorks із використанням розробленого макроса для автоматизованого балансування колінчастого вала.

```

Sub RunBalancingProcess ()

    Dim swApp As SldWorks.SldWorks
    Dim swModel As ModelDoc2

    Dim bal As New clsBalancer
    Dim geom As New clsGeometryBuilder
    Dim ctrl As New clsController

    Set swApp = Application.SldWorks
    Set swModel = swApp.ActiveDoc

    Dim axisPoint(2) As Double
    axisPoint(0) = 0: axisPoint(1) = 0: axisPoint(2) = 0

    Dim axisDir(2) As Double
    axisDir(0) = 0: axisDir(1) = 0: axisDir(2) = 1

    Dim neededMass As Double
    neededMass = bal.CalculateCounterweight(swModel, axisPoint, axisDir)

    ' Побудова секторної противаги
    geom.BuildSectorCounterweightClass swModel, _
        r1:=0.015, r2:=0.035, _
        angle:=60, thickness:=0.012

    bal.FinalizeBalance swModel

End Sub

```

Рисунок 10 – Ініціація виклику методів через контролер

1. clsBalancer — виконує функції математичного апарату розрахунків:

- визначення положення центра мас;
- обчислення величини дисбалансу,
- визначення необхідної маси противаги,
- верифікація результатів балансування.

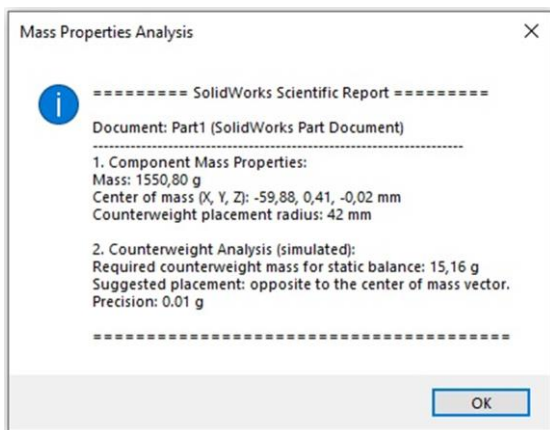
2. clsGeometryBuilder — відповідає за формування геометричних елементів:

- циліндричні противаги,
- дискові противаги,
- секторні противаги,
- комбіновані конфігурації,
- елементи монтажу (пази, отвори, посадові поверхні).

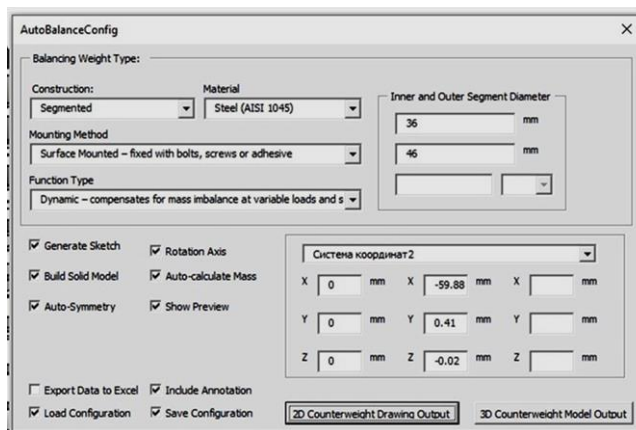
3. clsController — здійснює керування алгоритмом та взаємодією між класами:

- отримання вхідних даних із форми,
- передача параметрів до clsBalancer,
- ініціація побудови через clsGeometryBuilder,
- оновлення моделі,
- реалізація повного циклу «розрахунок → моделювання → перевірка».

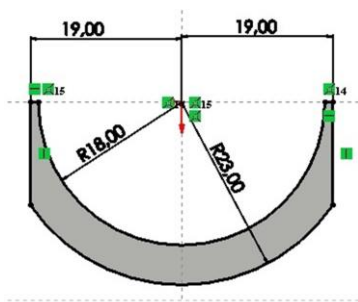
Програмне забезпечення (рис. 11, рис. 12) виконує автоматизоване зчитування масових характеристик деталі, визначає зміщення центра мас відносно осі обертання, обчислює необхідну масу противаги, генерує ескіз її гео-



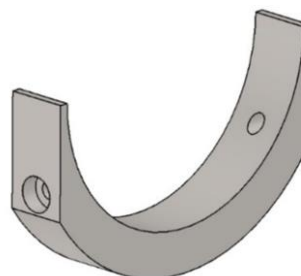
**Рисунок 11 – Графічне відображення інтерфейсу програми для розрахунку маси противаги**



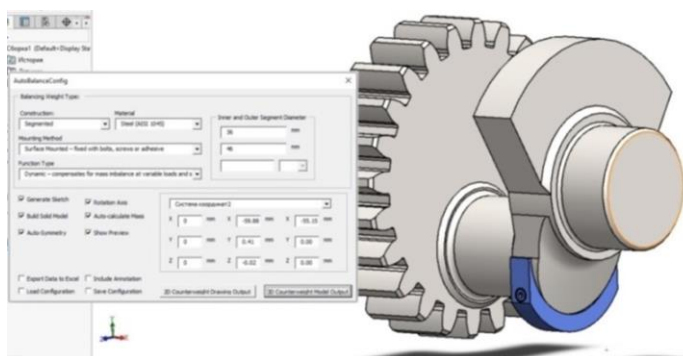
**Рисунок 12 – Графічне представлення основного вікна програми**



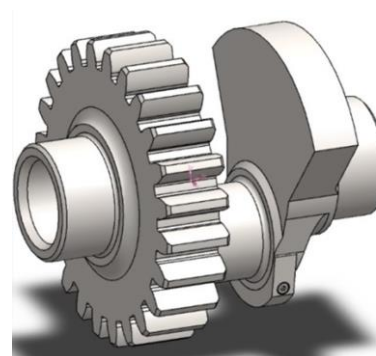
**Рисунок 13 – Ескіз противаги**



**Рисунок 14 – 3D-модель противаги**



**Рисунок 15 – Встановлення противаги на деталь колінчастий вал**



**Рисунок 16 – Визначення координат центра мас збалансованого колінчастого вала з противагою**

метрії та формує тривимірну модель із врахуванням конструктивних елементів кріплення. У результаті отримується повністю збалансована модель колінчастого вала, придатна для подальшого аналізу або виготовлення.

Відповідно до результатів розрахунків, виконаних у запропонованій програмі було сформовано креслення противаги (рис. 13) та створено її 3D-модель (рис. 14), яка надалі встановлена на колінчастий вал (рис. 15).

Відповідно до пункту 8 запропонованої методології виконано перевірку масових характеристик після балансування та визначено координати центра мас збалансованого колінчастого вала з противагою (рис. 16). Результати розрахунків координат центра мас (рис. 16) свідчать, що вздовж осей Y та Z значення координат дорівнюють  $Y = 0$  та  $Z = 0$ , що підтверджує успішне балансування колінчастого вала.

Configuration: Default  
 Coordinate system: Coordinate system2  
 Mass = 1566.4 grams  
 Volume = 201119.79 cubic millimeters  
 Surface area = 41108.00 square millimeters  
 Center of gravity : (millimeters)  
 X = -55.15  
 Y = 0.00  
 Z = 0.00

Principal axes of inertia and principal moments of inertia:

( grams \* square millimeters

Center of gravity : (millimeters)

$I_x = (0.99, 0.16, 0.00)$   $P_x = 1111633.80$

$I_y = (-0.16, 0.99, 0.00)$   $P_y = 1563561.39$

$I_z = (0.00, 0.00, 1.00)$   $P_z = 1699040.95$

Moments Inertia: ( grams \* square millimeters )

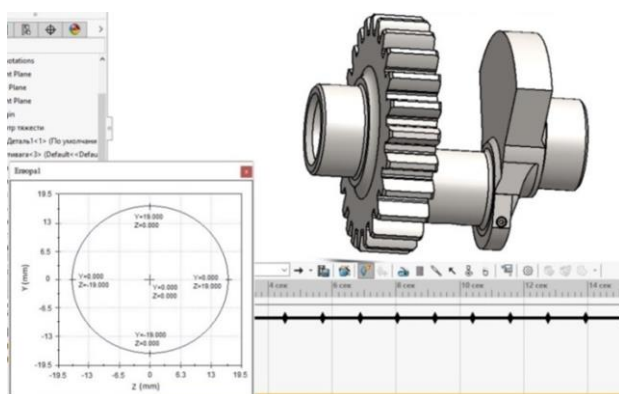
Determined at the center of gravity and aligned with the output coordinate system.

$L_{xx} = 1123334.31$   $L_{xy} = 71769.65$   $L_{xz} = -42.39$

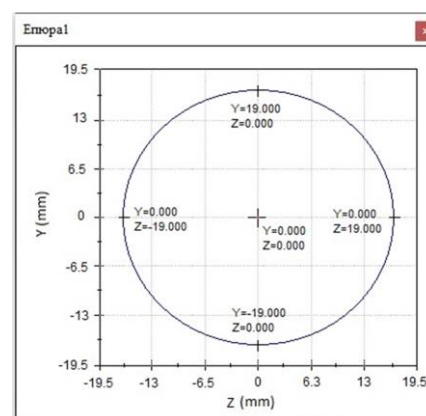
$L_{yx} = 71769.65$   $L_{yy} = 1551861.05$   $L_{yz} = 147.09$

$L_{zx} = -42.39$   $L_{zy} = 147.09$   $L_{zz} = 1699040.78$

**Рисунок 17 – Результати визначення маси та координат центру ваги колінчастого вала з противагою в середовищі SolidWorks**



**Рисунок 18 – Графічне відображення в SolidWorks Motion траєкторії руху центральної точки діаметра корінної шийки вала за частоти обертання 1500 об/хв**



**Рисунок 19 – Траєкторія руху центральної точки діаметра корінної шийки збалансованого вала**

У подальших дослідженнях динаміки обертального руху збалансованого колінчастого вала в середовищі SolidWorks Motion було встановлено траєкторію руху центральної точки діаметра корінної шийки за частоти обертання 1500 об/хв (рис. 18).

Аналіз траєкторії руху центральної точки діаметра корінної шийки збалансованого вала (рис. 19) підтвердив відсутність динамічних навантажень, пов'язаних із дисбалансом, а також відсутність биття за осями Y та Z (відповідно  $Y = 19,0$  та  $Z = 0$  та  $Y = 0$  та  $Z = 19,0$ ).

Для оцінки ефективності впровадженого VBA-макроса проведено порівняльний аналіз двох методів балансування деталей і складальних одиниць у середовищі SolidWorks: класичного ручного підходу та автоматизованого способу, реалізованого за допомогою макросів. Дослідження виконано за чотирма основними критеріями: час виконання операцій, кількість

допущених помилок і точність визначення центра мас (табл. 1).

**Таблиця 1 – Порівняльні результати дослідження**

Показник	Ручне балансування	Автоматизоване (VBA-макрос)
Середній час на одну деталь (хв)	15	1
Середній час на збірку (хв)	30	4
Кількість помилок (%)	14	1
Середнє відхилення центру (мм)	0.05	0.001

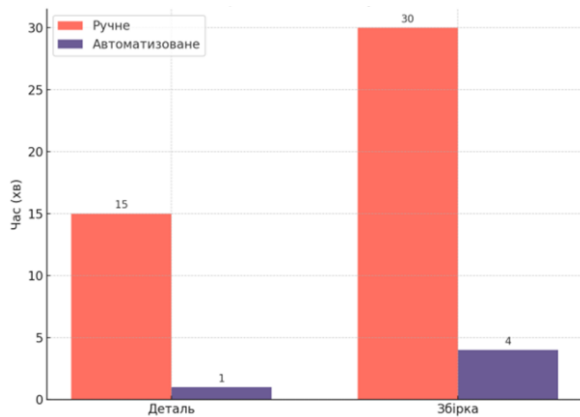


Рисунок 20 – Середній час балансування

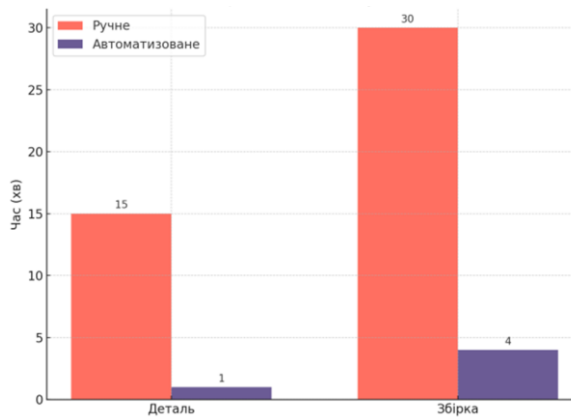


Рисунок 21 – Помилки та відхилення від центру мас

### Висновки

Використання запропонованої методології визначення масово-інерційних та кінематичних характеристик складного рухомого об'єкта на етапі проектування в середовищі SolidWorks дає змогу суттєво зменшити часові витрати на отримання масових параметрів у порівнянні з натурними експериментами. Це досягається за рахунок заміни фізичних випробувань комп'ютерним моделюванням, а також усунення впливу суб'єктивних похибок вимірювань, що в результаті підвищує точність статичного балансування складних механічних систем.

Використання макросів у SolidWorks є дієвим інструментом автоматизації інженерних розрахунків та процесів моделювання. Розроблений VBA-макрос (Visual Basic for Applications) інтегрується з API SolidWorks, що забезпечує пряме керування геометричними параметрами, властивостями матеріалів і масо-інерційними характеристиками 3D-моделі.

Реалізований програмний алгоритм виконує визначення центра мас, розрахунок необхідної маси противаги та її оптимального розташування, а також автоматично формує тривимірну модель противаги з елементами кріп-

лення відповідно до отриманих параметрів. Використання умовних операторів, циклів і функцій API SolidWorks забезпечує високу точність позиціонування, скорочує час проведення експериментального балансування та мінімізує вплив людського фактора.

Автоматизований процес балансування в SolidWorks із застосуванням VBA-макросів забезпечує не лише підвищення точності інженерних розрахунків, але й формує стандартизований, керований та інтегрований процес проектування, що сприяє зменшенню витрат і підвищенню якості готового виробу.

Застосування розробленого макроса дозволяє скоротити тривалість проектних робіт на 60–80%, підвищити точність обчислень і забезпечити відтворюваність результатів. Це робить запропоновану методику ефективною для проектування колінчастих валів, роторів та інших деталей, для яких критичними є масова симетрія та динамічна рівновага.

### Подяки

Відсутні.

### Конфлікт інтересів

Відсутній.

### Список використаних джерел / References

1. Stoyan Y. G., Yakovlev. S. V. Mathematical models and optimization methods of geometric design. Kyiv: Nauk. opinion. 1986. 268 p.
2. Stoyan Y. G., Putyatyn V. P. Location of sources of physical fields. Kyiv: Nauk. dumka, 1981. 184 p.
3. Yakovlev S. V., Gil N. I., Komyak V. M Elements of the theory of geometric design. Ed. V. L. Rvacheva. Kyiv: Nauk. dumka, 1995. 241 p.
4. The Concept of a Regional Information-Analytical System for Emergency Situations / I. Grebennik, O. Khriapkin, A. Ovezgeldyyev, V. Pisklakova, I. Urniaieva. *International Conference on Information Technology in Disaster Risk*. Vol. 516. Springer, Cham, 2019. P. 55–66. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-01665-4\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-01665-4_5)

5. Grebennik I. V., Romanova T. E., Shekhovtsov S. B. Decision making in information systems for solving geometric design problems. *Bionics of Intelligence*. 2008. №.1 (68). P. 79–83. <https://doi.org/10.1007/s10559-008-9008-5>
6. Combinatorial configurations in optimization problems of balanced layout / Grebennik I. V. et al. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2018. Vol. 54, №.2. P. 55–67. <https://doi.org/10.1007/s10559-018-0020-1>
7. Balance Layout Problem for 3D-Objects: Mathematical Model and Solution Methods / Kovalenko A. A. T. E. Romanova, P. I. Stetsyuk. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2015. Vol. 51, №4. P. 556–565. <https://doi.org/10.1007/s10559-015-9735-0>
8. Balance Layout Problems: Mathematical Modeling and Nonlinear Optimization / Yu. Stoyan, T. Romanova, A. Pankratov, A. Kovalenko, P. Stetsyuk // *Space Engineering. Modeling and Optimization with Case Studies*. G. Fasano and J. Pintér (Eds.). *Springer*, New York. 2016. Vol. 114, pp. 369–400. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-25042-5\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-25042-5_12)
9. Construction of initial points and search for local extrema of the problem of arranging 3D objects in a cylindrical region / Stoyan Yu. G. et al. *Reports of the NAS of Ukraine*. 2013, №.12, pp. 52–58. <https://doi.org/10.1007/s10559-013-9501-0>
10. Stoyan Yu., Romanova T. Mathematical Modeling of Interaction of Primary Geometric 3D Objects. *Cybernetics and system analysis*. 2005. Vol. 41. № 3. P. 332–342. <https://doi.org/10.1007/s10559-005-0086-3>
11. G. Fasano and J. Pintér. Modeling and Optimization in Space Engineering. *Springer*, New York, 2013. Vol. 73. P. 363–388. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4614-4469-5>
12. Tools of mathematical modelling of arbitrary object packing problems / J. Bennell etc. *Annals of Operations Research*. *Springer*, Netherlands, 2010. Vol. 179. № 1. P. 343–368. <https://doi.org/10.1007/s10479-010-0695-0>
13. Stoyan Yu., Yaskov G. Packing unequal circles into a strip of minimal length with a jump algorithm. *Optimization Letters*. 2014. Vol.8(3). P. 949–970. <https://doi.org/10.1007/s11590-012-0573-8>
14. Stoyan Yu., Yaskov G., Scheithauer G. Packing of Various Solid Spheres into a Parallelepiped. *Central European Journal of Operational Research*. 2003. Vol. 11(4). P. 389–407. <https://doi.org/10.1023/A:1025017422858>
15. Obtaining local extremum in the problem of covering the fields by the circles of variable radii / V. M. Komyak etc. *VCuM*. 2016, №2, pp. 22–27.
16. The problem of covering the fields by the circles in the task of optimization of observation points for ground video monitoring systems of forest fires / V. Komyak etc. *Econtechmod an International Quarterly Journal*. 2016, vol.5, №2, pp. 133–138. <https://doi.org/10.2478/ectm-2016-0018>
17. Mathematical methods of optimization and intelligent computer technologies for modeling complex processes and systems with the organization of spatial forms of objects / V. V. Gritsik et al. Donetsk: IPII "Science and Light". 2011. 650 p.
18. Hulianytskyi L., Malyshko S. Big Data in Information Analytical System "NEWSCAPE". In: *Data Stream Mining & Processing*. Proc. IEEE First Int. Conf. on Data Stream Mining & Processing (23-27 August 2016, Lviv, Ukraine). P. 382–386. <https://doi.org/10.1109/DSMP.2016.7752038>
19. Optimal clustering of a pair of irregular objects / J. A. Bennell etc. *Journal of Global Optimization*. 2015. № 61(3). P. 497–524. <https://doi.org/10.1007/s10898-013-0127-6>
20. Bennell J. A., Oliveira J. F. The geometry of packing problems: A tutorial. *Europ. Journal of Oper.* 2008. Vol. 184, Issue 2, pp. 397–415
21. Tools of mathematical modelling of arbitrary object packing problems / J. Bennell etc. *Annals of Operations Research*. *Springer*, Netherlands, 2010. Vol. 179. № 1. P. 343–368.
22. Sun Z., Teng H. Optimal layout design of a satellite module. *Engineering optimization*. 2003. № 35 (5). P. 513–530. <https://doi.org/10.1080/0305215031000153735>
23. Fasano G. A. Global Optimization point of view for non-standard packing problems. *J. Glob. Optim.* 2013 Vol. 55 (2), pp. 279–299 <https://doi.org/10.1007/s10898-011-9848-1>
24. G. Fasano, J. D. Model Development and Optimization for Space Engineering: Concepts, Tools, Applications, and Perspectives. *Modeling and optimization in space engineering. Series: Springer optimization and its applications*. 2012 Vol. 73, pp. 1–32.

25. Fasano G. MIP-based heuristic for non-standard 3D-packing problems. 4OR: *Quarterly Journal of the Belgian, French and Italian Operations Research Societies*. 2008. Vol. 6, Issue 3, pp. 291–310. <https://doi.org/10.1007/s10479-007-0201-7>

26. Fasano G., Pinter J. editors. *Modeling and Optimization in Space Engineering*, Dordrecht: Springer. 2013. 404 p.

27. Method for determining the position of the center of a wheeled transport vehicle at a vertical plane No. 19059, IPC B60C 23/0021. u 200500902. / Kozlinsky M. P., Denis V. V. Application. 02/01/2005. Publ. 12/15/2006, Bulletin. №.12.

28. A method for determining the position of the point in the center of the mass of a commercial vehicle. No. 63957 MPK G01M 17/00(21) u201103793 / Polyakov A. P., Grechanyuk M. S. Appl. 03/29/2011. Publ. 10/25/2011, Bulletin №.20.

29. Method of determining the position of the center of the body. No. 68193 G01B. u 2010 15512; / Pogorilets O. M., Aniskevich L. V. Application 12.23.200 Publ. 08/25/2011, Bulletin. №.16.

30. Stoyan Yu. G. Yakovlev S. V. Configuration space of geometric objects. *Cybernetics and systems analysis*. 54, VIP. №.5, 2018, pp. 715–722.

31. Yakovlev S. V. Method of piece expansion of space in problems of optimal packaging of geometric objects. *Cybernetics and systems. Analysis*. VIP. №.53(5). 2017, pp. 725–732.

32. Mathematical methods of optimization and intelligent computer technologies for modeling complex processes and systems resulting from spatial forms of objects / Gritsik V. V. et al. Donetsk: IPII "Science and Light". 2011. 650 p.

33. Combinatorial configurations in optimization problems of balanced layout / Grebennik I.V., Ta. *Cybernetics and systems analysis*. T. 54, №.2. 2018, pp. 55–67.

34. Balance problem of 3D object composition: Mathematical model and decoupling methods / Kovalenko A. A. and in. *Cybernetics and systems analysis*. 2015. VIP. 51, №.4, pp. 556–565.

35. Tools for mathematical modeling and packaging of additional problem objects. / J. Bennell, G. Ta in. *Chronicles Follow-up of operations*. Springer, The Netherlands, Vol. 179. №.1. 2010, pp. 343–368.

36. Wang Y. S., Shi Y. J., Teng H. F. An improved scatter search for circles packing problem with the equilibrium constraint. *Chinese J Comput.* № 32. 2009. №.1214–1221. DOI: 10.3724/SP.J.1016.2009.01214.

37. G. Fasano, J. D. Pinte'r (Eds.). *Model Development and Optimization for Space Engineering: Concepts, Tools, Applications, and Perspectives*. Modeling and optimization in space engineering. Series: *Springer optimization and its applications*. Vol. 73, 2012. P. 1–32.

38. Optimization Models for the Three-Dimensional Container Loading Problem with Practical Constraints. / L. Junqueira yec. Modeling and optimization in space engineering. Series: *Springer optimization and its applications*. Vol. 73, 2015, pp. 271–294. Doi: 10.1007/978-1-4614-4469-5-12. [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4469-5\\_12](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4469-5_12)

39. Pavlovsky M. A. *Theoretical mechanics*. Textbook. K.: Technika, 2004. 512 p.

40. Deynichenko G. V., Tsvirkun L. O., Omelchenko O. V. *Theoretical mechanics: a textbook*. Kryvyi Rih: DonNUET, 2021. 107 p.

41. Blinov I. A. Method for determining the spatial position of the center of gravity of machines. *Mechanics. Bulletin of the Almaz-Antey Concern of the East Kazakhstan Region* №.2, 2019. P. 71–82.

42. Leontiev D. M. On the calculation method for determining the height coordinate of the center of gravity of typical cars. *Automobile Transport*, №.37, 2015. P. 101–107.

43. Gorohovsky V. O., Gordeev A. I. Application of the SOLIDWORCS software product to determine the mass, kinematic and dynamic characteristics of the motion of objects of complex volumetric geometric configuration. *Bulletin of Khmelnytsky National University. Technical Sciences*, №.6, (329). 2023. P. 415–420.

44. Gorohovsky V. O., Gordeev A. I. Creation of a methodology for determining the kinematic characteristics of moving objects of complex volumetric configuration. *Bulletin of Khmelnytsky National University. Technical Sciences*, №.4, 2024 (339). P. 482–490.

45. Gorohovsky V., Gordeev A., Kostyuk N. Research into the kinematics of motion of statically balanced special turning devices during their design in SOLIDWORKS. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 353(3.2), 2025 P.329-341. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-353-47>

## APPLICATION OF SOLIDWORKS IN THE PROCESS OF STATIC BALANCING DURING THE DESIGN OF GEOMETRIC PARAMETERS OF THE CRANKSHAFT DESIGN

### **Hordieiev A. I.**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Inventor of Ukraine  
Khmelnyskyi National University  
11, Instytutska Str., Khmelnytskyi, 29000, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-4494-4348>  
e-mail: aigordeev54@ukr.net

### **Kostiuk N. O.**

PhD, Associate Professor  
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas  
15, Karpatska Str., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0001-6223-6412>  
e-mail: nazkost92@gmail.com

### **Horokhovskiy V. O.**

Postgraduate Student  
Khmelnyskyi National University  
11, Instytutska Str., Khmelnytskyi, 29000, Ukraine  
<https://orcid.org/0009-0002-0676-0038>  
e-mail: Sertgoroh@gmail.com

**Abstract.** The paper considers the solution of an actual scientific and technical problem, namely the creation of a methodology for static balancing of complex rotating systems using the example of the process of designing the structural parameters of crankshafts with the help of the SolidWorks software product, which makes it possible to speed up the process of static balancing even in the design process, increases the accuracy of the process and reduces the time for conducting final experimental studies on the choice of mass and place of application of the counterweight. The sequence of actions during the implementation of the methodology of static balancing of the crankshaft in the design process is proposed. SolidWorks Motion graphically visualized the trajectory of the central point of the diameter of the root neck of the crankshaft during rotation, both unbalanced and balanced, in SolidWorks Motion. From the obtained trajectory of the movement of the central point of the diameter of the root neck of the unbalanced crankshaft, it was established that the beating at the extreme points is 0.103 mm, which indicates the need to establish a counterweight to eliminate the imbalance. To increase the accuracy and speed of the crankshaft balancing process in the SolidWorks environment, a special macro has been developed that automates the main stages of determining the mass and location of the counterweight. The program automatically reads the mass characteristics of the part, determines the displacement of the center of mass relative to the axis of rotation, calculates the required mass of the counterweight, forms a sketch of its geometry and creates a three-dimensional model of the counterweight with the provided structural fastening elements. This makes it possible to obtain a finally statically balanced crankshaft model ready for further analysis or fabrication.

**Key words:** static balancing, crankshaft, SolidWorks, SolidWorks Motion, design automation, CAD modeling, imbalance, center of mass, counterweight, geometric parameters, SolidWorks macros, 3D modeling, engineering analysis, dynamics of rotating systems, mechanical engineering, computer modeling, design optimization, vibrations, crankshaft design, balancing of rotating systems.