

**МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ МОДЕЛЮВАННЯ КУЛАЧКОВИХ МЕХАНІЗМІВ**

*В статті представлені методи оптимізації моделювання кулачкових механізмів. В результаті експериментів було знайдено найбільш оптимальний спосіб редагування помилково введених вхідних даних, а саме – графічне редагування. Також були визначені методи графічного редагування, які дозволяють здійснити його з мінімальними відхиленнями від початково введених даних. Також був досліджений спосіб зчитування вхідної інформації з DXF-файлу, що формується CAD-системами і розроблений оптимальний варіант зчитування даних і запису в універсальний DXF-файл, який може бути відкритий в будь-якій CAD-системі.*

*Ключові слова:* кулачковий механізм, CAD-система, DXF-файл.

O.M. DUPLIAK, R.I. KOTSIYBA

Khmelnytsky National University

**METHODS FOR OPTIMIZATION OF THE CAM MECHANISMS MODELING**

*The article presents methods for optimization of the cam mechanisms modelling. As a result of experiments, there was found the most optimal way of editing erroneously entered initial data, namely, graphical editing. There also were defined graphical editing methods that allow to perform this editing with minimal deviations from the originally entered data. Also, a way of reading incoming information from a DXF-file, which is generated by CAD systems, was investigated and an optimal variant of data reading and recording into a universal DXF-file, which can be opened in any CAD-system, was developed. We get a method that allows the user, with minimal effort, to correct errors in modelling the cam profile, which lead to a profile break. On the basis of this method, a software application was created that allows you to optimize immediately after reading the input data from the DXF file. This product will be useful for both beginner engineers and professionals as it can save your time. While using the software application, we get the possibility of multivariate calculations of the parameters of cam mechanisms, their analysis at all stages of designing... In this case, universal methods of approximating the functions of their numerical integration are used. When using numerical methods, the algorithm is constructed on the basis of simple sequential calculations. Considerably further processing and transfer of received data in the form of DXF-files are simplified. The cam mechanisms are widespread in various industries. Cam mechanisms with a plate pusher and power circuit with a spring are used in automobile construction, in the internal combustion engines. The cam mechanisms differ in the type of propeller movement, the type of cam, the design of the pusher, the method of closing the pusher and the cam. This article helps to create and explore the process of optimization with the help of economic and mathematical modeling of cam mechanisms and accelerating the process of pushing.*

*Keywords:* cam mechanism, CAD-system, DXF-file.

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.** Використання сучасного програмного забезпечення дозволяє суттєво підвищити швидкість виконання проектно-технологічних робіт. Одним з напрямків в розробленні сучасних пакувальних машин, дозуючих апаратів, технологічного устаткування є проектування кулачкових механізмів. Але ця тема знаходиться у процесі дослідження, так як на сьогодні не має одного сформованого методу який би використовувався як основний. Тому, дана тема є актуальною та перспективною для подальших досліджень.

**Аналіз останніх досліджень чи публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор.** Існує цілий ряд методів синтезу важільних напрямних механізмів та побудованих на їх основі механізмів із зупинкою, однак вони забезпечують, як правило, лише частковий розв'язок поставленої задачі. Частина таких методів використовує умови найкращого наближення за Чебишовим, проте, не дивлячись на значну кількість робіт, що присвячені синтезу таких механізмів не має чіткого визначення конкретного методу. Даною проблематикою, на сьогодні займаються такі вчені-науковці, як Р. Д. Іскович-Лотоцький, В. П. Міськов, А. В. Слабкий, З. А. Стоцько, Т. О. Стефанович, Ю. В. Човнюк, М. Г. Діктерук, К. І. Почка та інші.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.** Однак суттєвим недоліком зазначених вище досліджень є неможливість аналітичного прогнозування величини ділянки наближення, що унеможливує проведення синтезу за заданою тривалістю зупинки вихідної ланки, невирішеною залишається також задача оптимізаційного синтезу таких механізмів, зокрема синтез за заданими величинами максимального ходу вихідної ланки, точністю наближення, синтез з метою отримання найменших габаритів, металоємкості, сприятливих кінематичних характеристик тощо. Це, в свою чергу, можливо тільки за допомогою побудови меж існування механізмів, що забезпечують задану тривалість зупинки вихідної ланки.

**Постановка завдання.** Кулачкові механізми широко поширені в різних галузях промисловості. В автомобілебудуванні, в двигунах внутрішнього згоряння використовуються кулачкові механізми з тарільчатим штовхачем і силовим замиканням пружиною. В технологічному обладнанні – в пружинно-навивальних верстатах і холодно-висадочних автоматах використовуються плоскі дискові кулачки з качаючим штовхачем і силовим замиканням пружиною. Кулачкові механізми відрізняються за типом руху штовхача, типом кулачка, конструкцією штовхача, способом замикання штовхача і кулачка. Дана стаття допомагає створити та дослідити процес оптимізації за допомогою економіко-математичного моделювання кулачкових механізмів та пришвидшення процесу штовхання останніх.

**Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів.** Вхідні данні для проектування кулачка складаються з загальних вимог до роботи механізму. Наприклад, в дозуючих механізмах необхідно узгоджувати механічні переміщення встановлення і центрування пляшки з фізичними процесами дегазування і наповнення.

Вхідні данні для проектування можуть надаватись як в вигляді текстового файлу з даними в табличній формі, так і в вигляді графічного представлення залежності передаточної функції руху в одній з САД систем - файлу з розширенням .dxf, що ми можемо побачити на рис. 1.

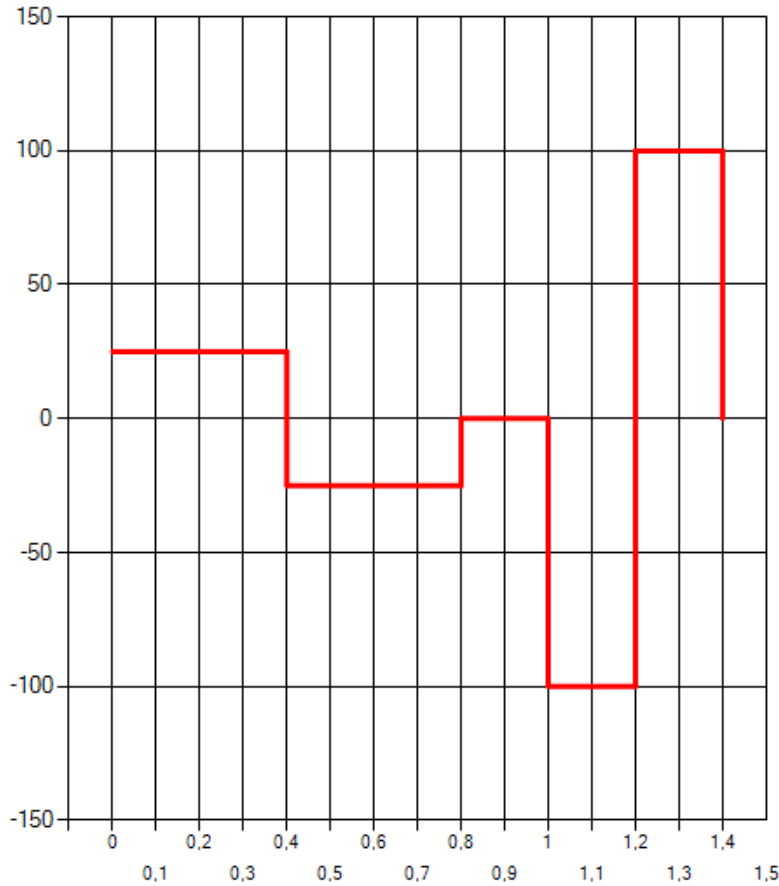


Рис. 1. Приклад вхідних даних

Файли в форматі DXF створюються в таких програмах, як Autodesk AutoCAD, NanoCAD, Autodesk Design Review, TurboCAD LTE Pro 7, Adobe Illustrator, Dassault Systemes, SolidWorks та інші.

Що в першому, що в другому випадку ці данні можуть не задовольняти таким умовам: протягом циклу руху штовхач кулачкового механізму повинен переміститися з початкового положення на величину ходу  $h$ , а потім повернутися в початкове положення, тобто переміщення штовхача на фазі віддалення повинно дорівнювати переміщенню на фазі зближення. Отже графік кінематичної передавальної функції швидкості повинен задовольняти умову:

$$\int_0^{\varphi_{\text{уд}}} V_{\text{QB}} \cdot d\varphi_i = \int_{\varphi_{\text{СД}}}^{\varphi_{\text{РОБ}}} V_{\text{QB}} \cdot d\varphi_i, \tag{1}$$

де  $\varphi_{\text{уд}}$  – кутова координата початкової точки фази зближення.

І в першому, і в другому випадку ці данні можуть не задовольняти наступним умови: протягом циклу руху штовхач кулачкового механізму повинен переміститися з початкового положення на величину ходу  $h$ , а потім повернутися в початкове положення, тобто переміщення штовхача на фазі віддалення повинно дорівнювати переміщенню на фазі зближення. Отже графік кінематичної передавальної функції швидкості повинен задовольняти умови:

$$\int_0^{\varphi_{\text{уд}}} V_{\text{QB}} \cdot d\varphi_i = \int_{\varphi_{\text{СД}}}^{\varphi_{\text{РОБ}}} V_{\text{QB}} \cdot d\varphi_i, \tag{2}$$

де  $\varphi_{\text{уд}}$  – кутова координата початкової точки фази зближення.

Швидкість і кінематична передавальна функція швидкості штовхача на фазах ближнього і дальнього вистою дорівнюють нулю. Щоб ці умови виконувалися, необхідно виконати співвідношення:

$$\int_0^{\varphi_{\text{уд}}} a_{\text{QB}} \cdot d\varphi_i = \int_{\varphi_{\text{уд}}}^{\varphi_{\text{уд}}} a_{\text{QB}} \cdot d\varphi_i = \int_{\varphi_{\text{СО}}}^{\varphi_{\text{СО}}+\varphi_{\text{СР}}} a_{\text{QB}} \cdot d\varphi_i = \int_{\varphi_{\text{СД}}+\varphi_{\text{СД}}}^{\varphi_{\text{РОБ}}} a_{\text{QB}} \cdot d\varphi_i, \tag{3}$$

де  $\varphi_{ур}$  – кутове переміщення при розгоні на фазі віддалення;

$\varphi_{ср}$  – кутове переміщення при розгоні на фазі зближення;

$\varphi_{ст} = \varphi_{роб} - (\varphi_{со} + \varphi_{ср})$  – кутове переміщення при гальмуванні на фазі зближення.

Ці умови необхідно враховувати під час побудови і аналізу безрозмірних графіків передавальної функції швидкості і передавальної функції прискорення, вирівнюючи відповідні зазначеним інтегралам площі над віссю абсцис і під нею.

Наприклад, при варіанті вхідних даних, що зображені на графіку прискорення, що зображений на рис. 2, ми отримуємо профіль кулачка з розривом, що є недопустимим. Як ми бачимо на цьому графіку кутове переміщення на фазі віддалення  $\varphi_{ур}$  більше за кутове переміщення на фазі зближення  $\varphi_{ср}$ .

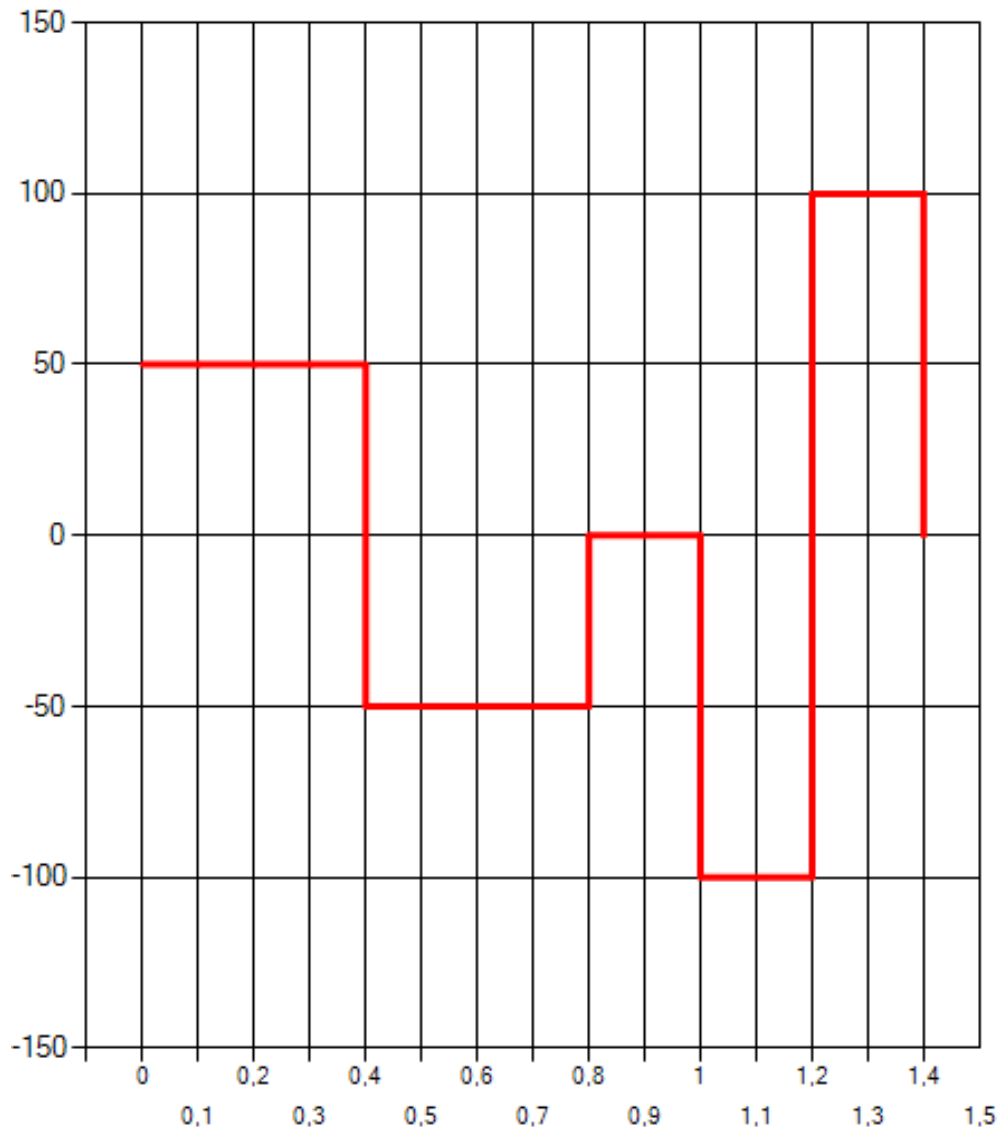


Рис. 2. Графік прискорення

На рис. 2 ми можемо спостерігати цей незамкнений профіль. Із відповідністю до формул (1–3), нам необхідно провести оптимізацію вхідних даних.

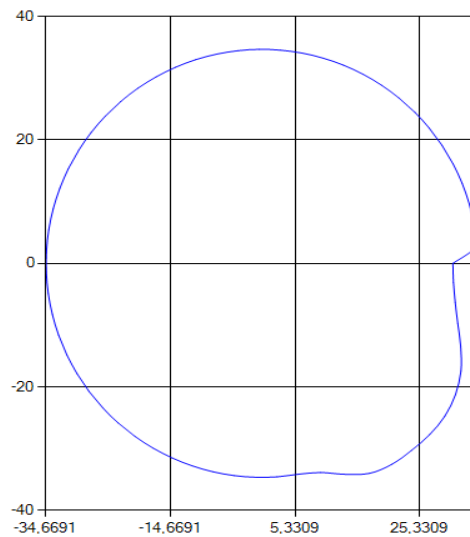


Рис. 3. Незамкнений профіль кулачка

Вихідні дані можуть бути представлені також у вигляді DXF-файлу, де може бути задано більш складний закон руху.

Даний програмний додаток дозволяє користувачу виконувати проектування профілю кулачкового механізму, вводячи початкові дані з текстового файлу, DXF-файлу або в внутрішньому редакторі програми. При цьому він дає можливість виправляти помилки, що допускає користувач в процесі моделювання та виводить йому графіки всіх кінематичних функцій, годограф швидкості, графік зміни кутів тиску в функції кута повороту, та сам профіль кулачка, а також здійснює запис результатів розрахунків як DXF-файл. Функціонал даного програмного додатку представлений на рис. 4.

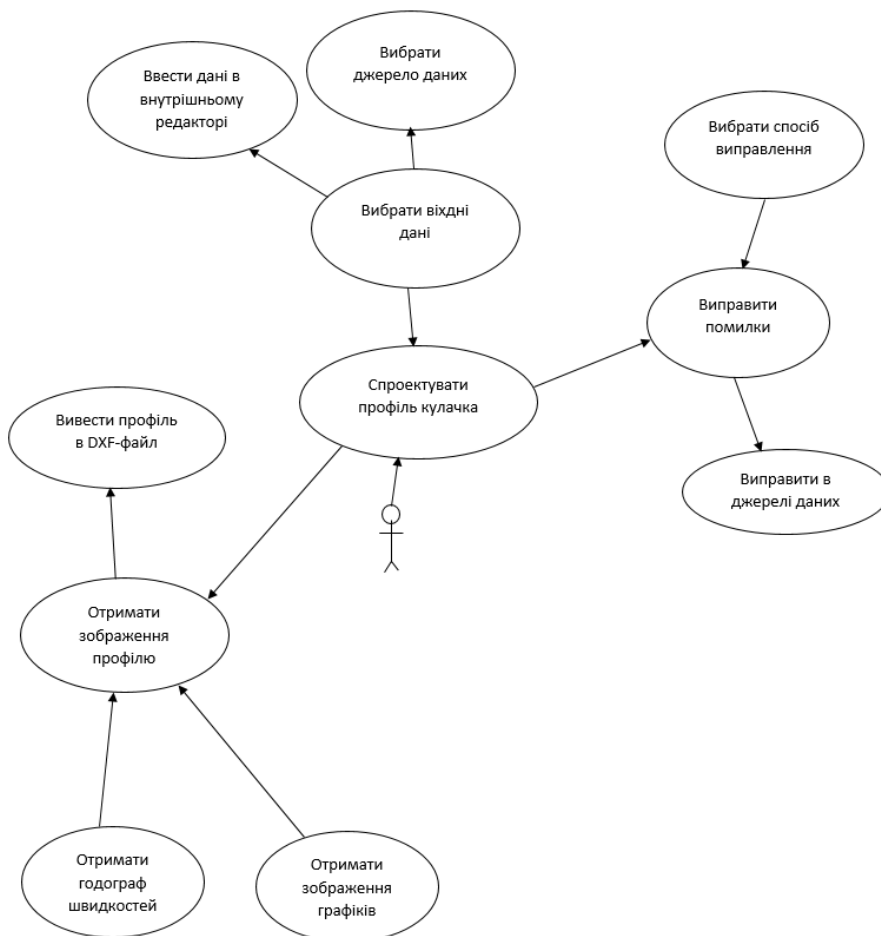


Рис. 4. Діаграма варіантів використання

Найбільш розповсюдженим варіантом є передача вхідних даних у вигляді DXF-файлу, сформованого CAD-системою. В даному файлі знаходиться примітив, що заданий полілінією, що зображує графік прискорення.

Наведемо загальну структуру файлу DXF:

- Розділ HEADER. Цей розділ містить відомості про креслення. Він складається з номера версії бази даних AutoCAD і деякої кількості системних змінних. У кожному параметрі міститься ім'я змінної і пов'язане значення.

- Розділ CLASSES. У цьому розділі надано інформацію для визначених додатком класів, екземпляри яких відображаються в розділах BLOCKS, ENTITIES і OBJECTS бази даних. Визначення класу постійно зафіксовано в ієрархії класів.

- Розділ TABLES. В цьому розділі наводяться визначення для наступних таблиць позначень:

1. APPID (таблиця ідентифікації додатків).
2. BLOCK\_RECORD (таблиця входжень блоків).
3. DIMSTYLE (таблиця розмірних стилів).
4. LAYER (таблиця верств).
5. LTYPE (таблиця типів шар).
6. STYLE (таблиця стилів тексту).
7. UCS (таблиця користувальницької системи координат).
8. VIEW (таблиця видів).
9. VPORT (таблиця конфігурацій видового екрану) [1].

- Розділ BLOCKS. У цьому розділі наводяться визначення блоку і графічні об'єкти креслення, які складають кожне входження блоку в кресленні.

- Розділ ENTITIES. Тут містяться графічні об'єкти креслення, включаючи входження блоків (об'єкти вставки).

- Розділ OBJECTS. Тут містяться неграфічні об'єкти креслення. В даному розділі зберігаються всі об'єкти, які не є графічними об'єктами, таблицями позначень або записами таблиці позначень. Прикладами записів в розділі OBJECTS є словники, що містять стилі мультіліній і групи.

- Розділ THUMBNAILIMAGE. Тут містяться дані зображень попереднього перегляду креслення.

Цей розділ є необов'язковим.

Нас, в першу чергу, цікавить підрозділ AcDbPolyline розділу ENTITIES, так як, саме в цьому підрозділі знаходяться координати і опис примітивів, які ми хочемо отримати з DXF файлу.

Файл DXF складається з пар кодів і пов'язаних з ними значень. Коди, названі груповими кодами, вказують тип значення, наступного за ними. За допомогою цих пар групових кодів і значень файл DXF об'єднується в розділи, що складаються із записів, які, в свою чергу, складаються з групового коду і елемента даних. Кожен груповий код і значення розташовуються в файлі DXF на власному рядку.

Кожен розділ починається з групового коду 0, за яким слідує рядок SECTION. За ним йде груповий код 2 і рядок із зазначенням імені розділу (наприклад, HEADER). Кожен розділ складається з групових кодів і значень. Розділ закінчується груповим кодом 0, за яким слідує рядок ENDSEC.

Розділ починається з маркера підкласу AcDbPolyline, код якого 100. Далі йде перелік кількості вершин під кодом 90, мітка полілінії під кодом 70, що відображає її тип, постійна ширина під кодом 43, за замовчуванням дана величина дорівнює нулю і не може бути задана, якщо товщина ліній є перемінною. Далі йде власне блок координат по  $X$  та  $Y$ , при цьому в значень по  $X$  код 10, у значень  $Y$  відповідно 20.

Процес зчитування інформації вказаний на діаграмі, що зображена на рисунку 5. Проте даний додаток повинен не лише здійснювати зчитування інформації з файлу, але й формувати DXF файл в якому записані координати робочого профілю кулачка.

Наведемо мінімум інформації, яку повинен містити DXF-файл, для того щоб його змогла прочитати САД-система наступний:

- макет початку секції;
- макет початку підрозділу;
- макет шару;
- макет координат точок  $X$  та  $Y$ ;
- макет кінця секції.

Такий DXF-файл складається з однієї секції, що починається к ключового слова SECTION та має код 0. Далі йде підрозділ ENTITIES, де міститься інформація про примітиви, що являються вхідними даними для програми [4].

Так як наша ціль створення DXF-файлу, що містить саму базову інформацію в даному підрозділі міститься лише інформація про шар, код якого 8 і який має назву 0, в якому зображений примітив, в нашому випадку завжди буде лише один шар.

Далі знаходиться перелік точок  $X$  та  $Y$  і кінець секції. Даний DXF-файл містить саму основну інформацію про примітив, який він отримав з додатку, та його може відкрити будь-який редактор, що має можливість працювати з файлами даного типу [5].

Редагування вхідних даних при проектуванні профілю кулачка буде наступною:

- користувачем обирається кут редагування;
- додаток визначає, збільшити чи зменшити потрібно площу графіка функції на даному куті;
- на обраному відрізьку обираються всі ключові точки, через які будуються полілінії;

- змінюється показник прискорення в обраних точках (збільшується максимум і зменшується мінімум якщо площу потрібно збільшити і навпаки);
- проводиться повторне обчислення всіх точок графіку з певним кроком (за замовчуванням 0,1) за формулою 1 [1].

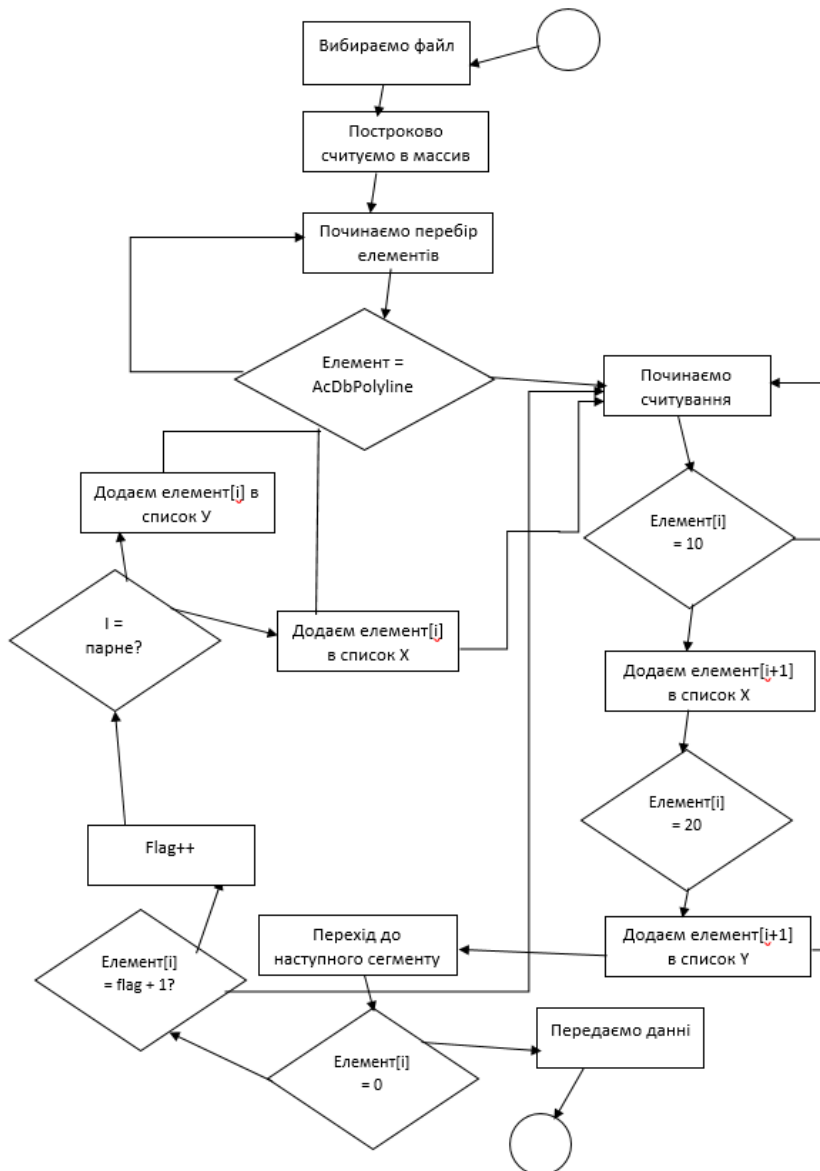


Рис. 5. Алгоритм зчитування DXF-файлу

- проводиться повторне інтегрування методом трапеції;
- Якщо площі стали рівні з обраною точністю, то вхідні дані вважаються відредаговані, якщо ні – все повторюється з кроку пошуку мінімуму та максимуму функції. По редагованим даним програма розраховує координати робочого профілю і створює вихідний DXF файл [2, 3].

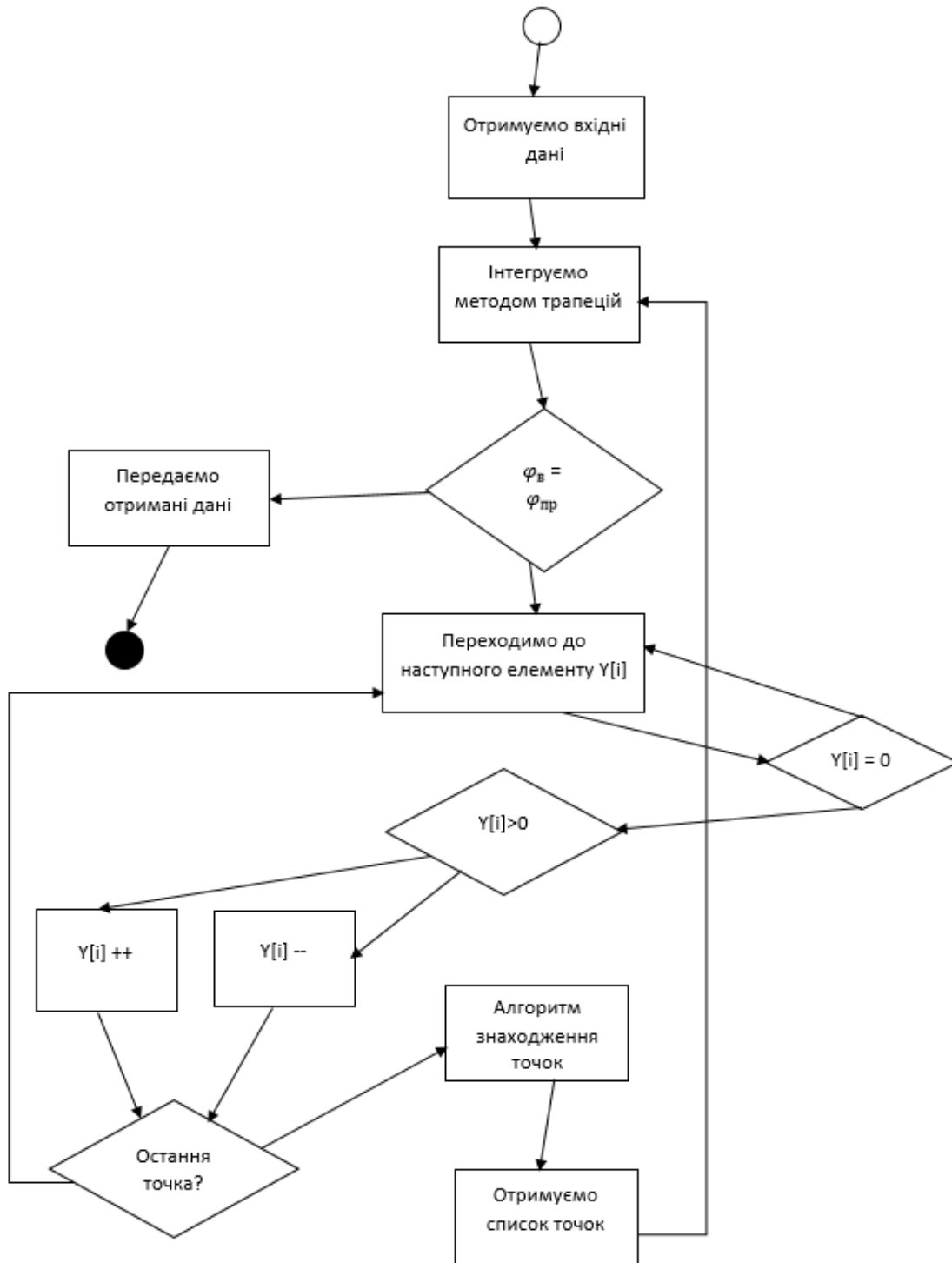


Рис. 6. Алгоритм редагування вхідних даних

**Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку.** В ході використання програмного додатку з'явилась можливість багатоваріантних розрахунків параметрів кулачкових механізмів, їхнього аналізу на всіх етапах проектування... При цьому використовуються універсальні методи апроксимації функцій їх чисельного інтегрування. При використанні чисельних методів алгоритм будується на базі простих послідовних розрахунків. Значно спрощена подальша обробка і передача отриманих даних в вигляді DXF-файлів.

Застосування даного програмного додатку дозволяє користувачеві мати доступ до редагування процесу створення кулачкового механізму на кожному етапі розрахунку, а саме:

1) при введенні вхідних даних – закону руху штовхача, який зображено графічно і подано у вигляді DXF-файлу для розрахунку даним програмним додатком значно скорочує час, що потрібен для введення вхідних даних для розрахунку;

2) 2) при введенні помилкових даних, що спричиняє до розривів у профілі кулачка користувач повинен поміняти вхідні дані. Програмний додаток додає наступні можливості до редагування вхідних даних:

- a) довільна зміна точки користувачем;
- b) автоматична зміна прискорення в точках максимуму і мінімуму, вважається що цих точок декілька і прискорення в них рівне;
- c) автоматична зміна прискорення в точках максимуму і мінімуму з подальшим перерахуванням всіх точок на основі проведених змін;
- d) автоматична зміна прискорення в всіх ключових точках;
- e) зміна прискорення обраним користувачем способом на конкретно вибраній ділянці;
- f) зміна фазового кута профілю кулачка;
- g) незначна зміна фазового кута профілю кулачка та зміна прискорення в ключових точках способом, який обирає користувач;

3) 3) варто взяти до уваги режим роботи кулачкового механізму, який може бути реверсивним або нереверсивним, з обмеженням кута тиску на фазі наближення або без нього. Забезпечення цих умов дозволяє користувачеві вносити корективи в розрахунок і зразу бачити його результат.

Таким чином ми отримуємо метод, що дозволяє користувачу, прикладаючи мінімальні зусилля, виправляти помилки в моделюванні профілю кулачка, що призводять до розриву профілю. На основі даного методу був створений програмний додаток, що дозволяє виконувати оптимізацію зразу після зчитування вхідних даних з DXF-файлу. Даний продукт буде корисний як для інженерів-початківців, так і для професіоналів, так як дозволяє значно заощадити час.

### Література

1. Леонов И.В. Проектирование и анализ кулачковых механизмов с помощью ЭВМ / И.В. Леонов, Н.Н. Барбашов. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 152 с.
2. Тимофеева Г.А. Теория механизмов и машин. Курсовое проектирование / Тимофеева Г.А., Умнов Н.В. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 154 с.
3. Назаренко И.И. Прикладные задачи теории вибрационных систем / Назаренко И.И. – К. : ИСИО, 1993. – 216 с.
4. Назаренко И.И. Перспективные направления создания и совершенствования уплотняющих машин в строительстве / Назаренко И.И., Гарнец В.Н. – К. : О-во – Знание УССР, 1987. – 16 с.
5. Маслов А.Г. Исследование виброплощадки для уплотнения цементно-бетонных смесей горизонтально направленными колебаниями и при-грузом / А.Г. Маслов, А.Ф. Иткин // Интерстроймех 2007 : материалы международной научно-технической конференции, 11–14 сентября 2007, г. Самара / Самарск. гос. арх.-строит. ун-т. – Самара, 2007. – С. 189–196.

### References

1. Leonov I.V. Proektirovanie i analiz kulachkovyih mehanizmov s pomoschyu EVM / I.V. Leonov, N.N. Barbashov. – М. : MGТУ im. N.E. Bauman, 2014. – 152 s.
2. Timofeeva G.A. Teoriya mehanizmov i mashin. Kursovoe proektirovanie / Timofeeva G.A., Umnov N.V. – М. : MGТУ im. N.E. Bauman, 2010. – 154 s.
3. Nazarenko I.I. Prikladnyie zadachi teorii vibratsionnyih sistem / Nazarenko I.I. – К. : ISIO, 1993. – 216 s.
4. Nazarenko I.I. Perspektivnyie napravleniya sozdaniya i sovershenstvo-vaniya uplotnyayuschih mashin v stroitelstve / Nazarenko I.I., Garnets V.N. – К. : O-vo – Znanie USSR, 1987. – 16 s.
5. Maslov A.G. Issledovanie vibroploschadki dlya uplotneniya tsemento-betonnyih smesey gorizontarno napravlennymi kolebaniyami i pri-gruzom / A.G. Maslov, A.F. Itkin // Interstroyemeh 2007 : materialyi mejdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii, 11-14 sentyabrya 2007 g. Samara / Samarsk. gos. arh.-stroit. un-t. – Samara, 2007. – S. 189–196.

Рецензія/Peer review : 31.05.2018 р.

Надрукована/Printed : 09.07.2018 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Григоруку П.М.