

РОЗДІЛ I. МЕХАНІКА

УДК 621.855.001.24

О.І. Пилипенко, д-р техн. наук

А.В. Полуян, аспірант

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

КОМПЛЕКСНЕ ОЦІНЮВАННЯ АНАЛІЗУ РУХУ РОЛИКА ЛАНЦЮГА ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОГРАМНОГО ПРОДУКТУ SOLIDWORKS

О.И. Пилипенко, д-р техн. наук

А.В. Полуян, аспирант

Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА АНАЛИЗА ДВИЖЕНИЯ РОЛИКА ЦЕПИ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА SOLIDWORKS

O.I. Pylypenko, Doctor of Technical Sciences

A.V. Poluyan, graduate student

Chernihiv State Technological University, Chernihiv, Ukraine

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE ANALYSIS OF MOTION ROLLER CHAIN USING SOFTWARE PRODUCT SOLIDWORKS

Представлено аналіз руху ролика ланцюга відносно координатних осей за допомогою програмного комплексу САПР – SolidWorks. Виявлено періодичні зміни лінійних та кутових переміщень, швидкостей та прискорень ролика ланцюгового контуру під час усталеного руху ланцюгової передачі. Розглянуто різку зміну кута набігання ролика на ведену зірочку в момент пуску та гальмування ланцюгової передачі.

Ключові слова: ланцюгова передача, аналіз, ролик.

Представлен анализ движения ролика цепи относительно координатных осей с помощью программного комплекса САПР – SolidWorks. Выявлены периодические изменения линейных и угловых перемещений, скоростей и ускорений ролика цепного контура при установившемся движении цепной передачи. Рассмотрено резкое изменение угла набегания ролика на ведомую звездочку в момент пуска и торможения цепной передачи.

Ключевые слова: цепная передача, анализ, ролик.

The analysis of the motion of a roller chain relative to the coordinate axes by means of software CAD – SolidWorks is presented. Periodic changes in linear and angular displacements, velocities and accelerations of roller chain contour during steady motion of the chain transmission are detected. There is a sharp change of angle foray roller on driven sprocket at the time of starting and braking chain transmission.

Key words: chain drive, analysis, roller.

Постановка проблеми. На сьогодні більшість машин потребує вдосконалення й оптимізації їх передач, зокрема ланцюгових, з метою зниження матеріаломісткості та енерговитрат. Ланцюгова передача являє собою систему, яка складається з великої кількості взаємодіючих елементів. Одним з основних напрямків досягнення цієї мети є використання сучасних САД програм [1; 2; 3], які використовують комплексний підхід до розв'язування складних задач, що пов'язані зі структурно-параметричним аналізом та оптимізацією.

До появи САД програм існували складності графічного проектування 3D-моделі ланцюгової передачі. Головною причиною використання САД програм є здатність проведення комп'ютерного експерименту з реально відтвореними умовами роботи машини, механізму.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання кінематики ланцюгової передачі розглядалися у роботах [4; 5], в яких дослідження кінематики передачі проводились без врахування наявності веденої вітки ланцюгового контуру.

У [6] було викладено подальший розвиток теорії та систематизовані наукові основи синтезу ланцюгових передач, які розглядалися як коливальна система. Робота ланцюгової передачі у вищенаведеній літературі описана диференціальними рівняннями крутильних коливань, при розв'язанні яких чисельним методом на ЕОМ отримують власні частоти та форми коливань ланцюгової передачі з практично будь-якою кількістю мас.

Більш точний та досконалий математичний апарат розв'язання диференціальних рівнянь використовується програмним продуктом SolidWorks, оскільки він враховує демпфірування деталей, маси віток ланцюгового контуру, їх інерційність.

Аналіз переміщень, швидкостей та прискорень ролика ланцюгової передачі відносно координатних осей за допомогою програмного комплексу SolidWorks, наскільки нам відомо, раніше не проводився.

Мета статті. Побудувати 3D-модель ланцюгової передачі та проаналізувати рух ролика ланцюга відносно координатних осей.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо процедуру аналізу продуктом SolidWorks рівнянь руху лінійної системи з n ступенями вільності, яка приведена в рух силою, що змінюється з часом t [7]:

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{f(t)\}, \quad (1)$$

де $[M] = n \times n$ – симетрична матриця інерції;

$[C] = n \times n$ – симетрична матриця демпфірування;

$[K] = n \times n$ – симетрична матриця жорсткості;

$\{f(t)\} = n$ – розмірний вектор сили;

$\{u\}$, $\{\dot{u}\}$, $\{\ddot{u}\}$ – n -розмірні вектори переміщення, швидкості і прискорення відповідно.

Рівняння (1) є системою n звичайних сумісних диференціальних рівнянь з постійними коефіцієнтами. Рівняння руху пов'язані через параметри мас, жорсткостей і демпфірування. Зв'язок залежить від системи координат, яка використовується для опису рівнянь руху.

Основною ідеєю дослідження методів розташування за власними формами коливань (модальний аналіз) є перетворення системи (1) в ряд незалежних рівнянь, використовуючи модальну матрицю $[\Phi]$ як матрицю перетворення. Вона має нормальні моди $\{f_i\}$ для $i = 1, \dots, n$, які розташовані таким чином:

$$[\Phi] = [\{\varphi_1\} \{\varphi_2\} \dots \{\varphi_n\}]. \quad (2)$$

Нормальні моди і власні значення системи отримуємо з розв'язку задачі:

$$[K][\Phi] = [M][\Phi][\omega^2], \quad (3)$$

де $[\omega^2]$ – діагональна матриця квадратів власних частот.

Система n рівнянь руху для лінійних систем може розділятися на n рівнянь з одним ступенем вільності в обчисленні модального вектора переміщення $\{x\}$:

$$\{u\} = [\Phi]\{x\}. \quad (4)$$

Підставивши вектор $\{u\}$ з рівняння (4) в рівняння (1) та помноживши його на транспоновану модальну матрицю $[\Phi]^T$, знайдемо:

$$[\Phi]^T [M][\Phi]\{\ddot{x}\} + [\Phi]^T [C][\Phi]\{\dot{x}\} + [\Phi]^T [K][\Phi]\{x\} = [\Phi]^T \{f(t)\}. \quad (5)$$

Нормальні моди задовольняють властивість ортогональності, а модальна матриця $[\Phi]$ є нормальною для того, щоб задовольняти такі рівняння:

$$[\Phi]^T [M][\Phi] = [1], \quad (6)$$

$$[\Phi]^T [C][\Phi] = 2[\xi][\omega]. \quad (7)$$

$$[\Phi]^T [K][\Phi] = [\omega^2]. \quad (8)$$

Виконавши підстановки рівнянь (6-8), рівняння (5) перетворюється на систему з n незалежних диференціальних рівнянь другого порядку (SDOF) для $i = 1, \dots, n$:

$$\ddot{x}_i + 2\xi \cdot \omega \cdot \dot{x}_i + \omega^2 x_i = \{\varphi_i^T\} \{f(t)\}. \quad (9)$$

Рівняння (9) розв'язується з використанням покрокових методів інтегрування, подібних до Wilson-Theta та Newmark. Інтегрування виконується в часовому просторі, де використовуються результати останнього кроку розташування ролика ланцюга для прогнозування наступного кроку.

Побудуємо 3D-модель ланцюгової передачі за такими параметрами: кількість зубців ведучої зірочки ($z_1 = 23$); кількість зубців веденої зірочки ($z_2 = 43$); профіль зубця "зі зміщенням"; клас точності зірочки "А"; ланцюг ПР-15,875-2300-1; попередня міжосьова відстань 555 мм; кут нахилу лінії центрів "0" (рис. 1).

Під час 3D-проекування використовуємо параметри та якісні характеристики зірочок ланцюгової передачі згідно з ГОСТ 591-69; ланцюг – згідно з ГОСТ 13568-97, що відповідає ISO 606-94.

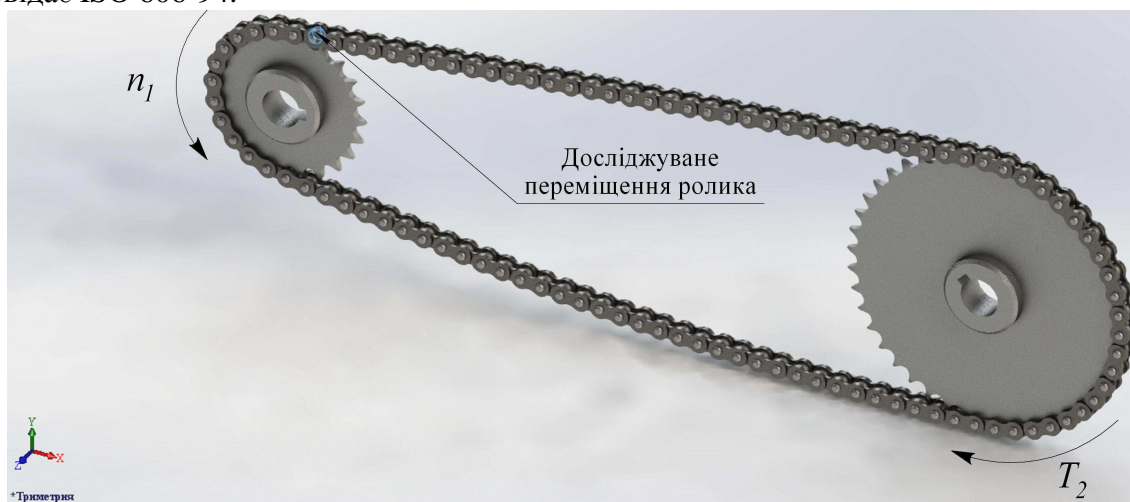


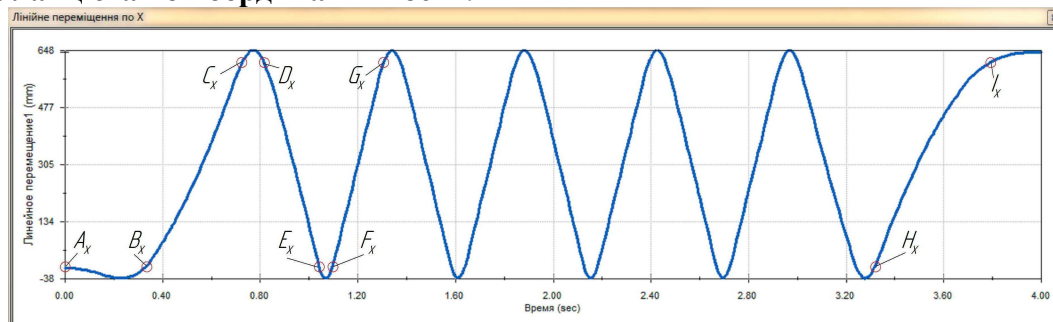
Рис. 1. 3D-модель ланцюгової передачі

Задамо швидкість обертання проти годинникової стрілки ведучої зірочки ($n_1 = 500 \text{ хв}^{-1}$) та момент опору веденої зірочки ($T_2 = 114,94 \text{ Н}\cdot\text{м}$). Вкажемо проміжок часу (0-4 секунд), протягом якого відбудуватиметься розрахунок. Зауважимо, що сила земного тяжіння ($g = 9,80665 \text{ м/с}^2$) направлена в напрямку, протилежному осі Y. Запустимо розрахунок та охарактеризуємо час аналізу руху всього 3D-механізму. Починаючи від 0 до 1 секунди, ведуча зірочка ланцюгової передачі поступово починає набирати оберти ($0-500 \text{ хв}^{-1}$), далі, від 1 до 3 секунд, – встановлюється робочий режим, а від 3 до 4 секунд ведуча зірочка поступово зменшує оберти ($500-0 \text{ хв}^{-1}$).

Після закінчення розрахунку виберемо довільний ролик ланцюга (рис. 1) та побудуємо графіки переміщень, швидкостей та прискорень відносно координатних осей (рис. 2-7).

Зауважимо, що програмний комплекс SolidWorks дає можливість визначити положення відносно глобальної системи координат будь-якої деталі у складальній одиниці на відповідному проміжку часу.

1. Аналіз кривих зміни лінійного переміщення, швидкості та прискорення ролика ланцюга по координатних осях.



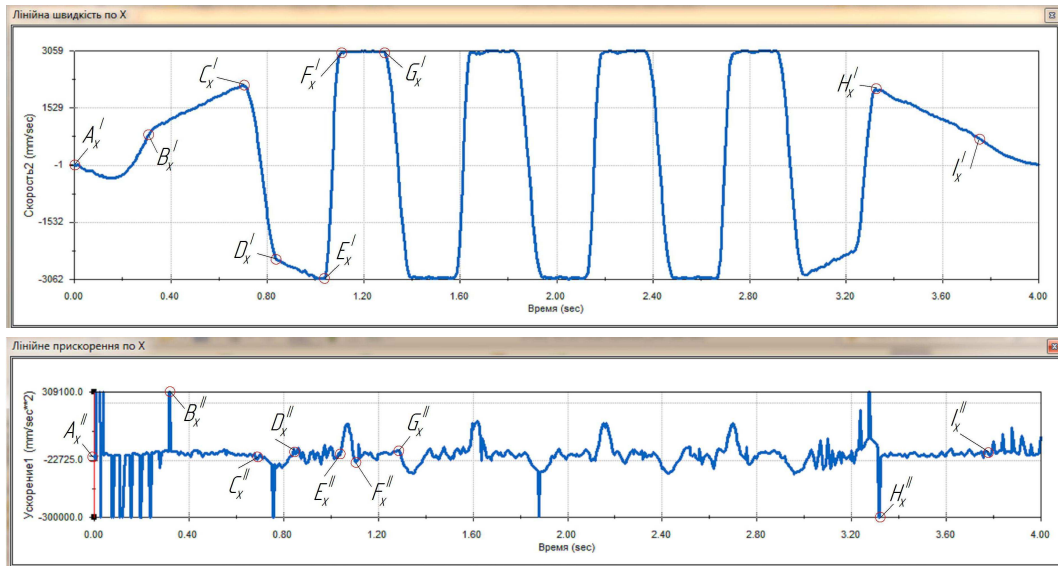


Рис. 2. Лінійні переміщення, швидкості та прискорення ролика ланцюга по осі X

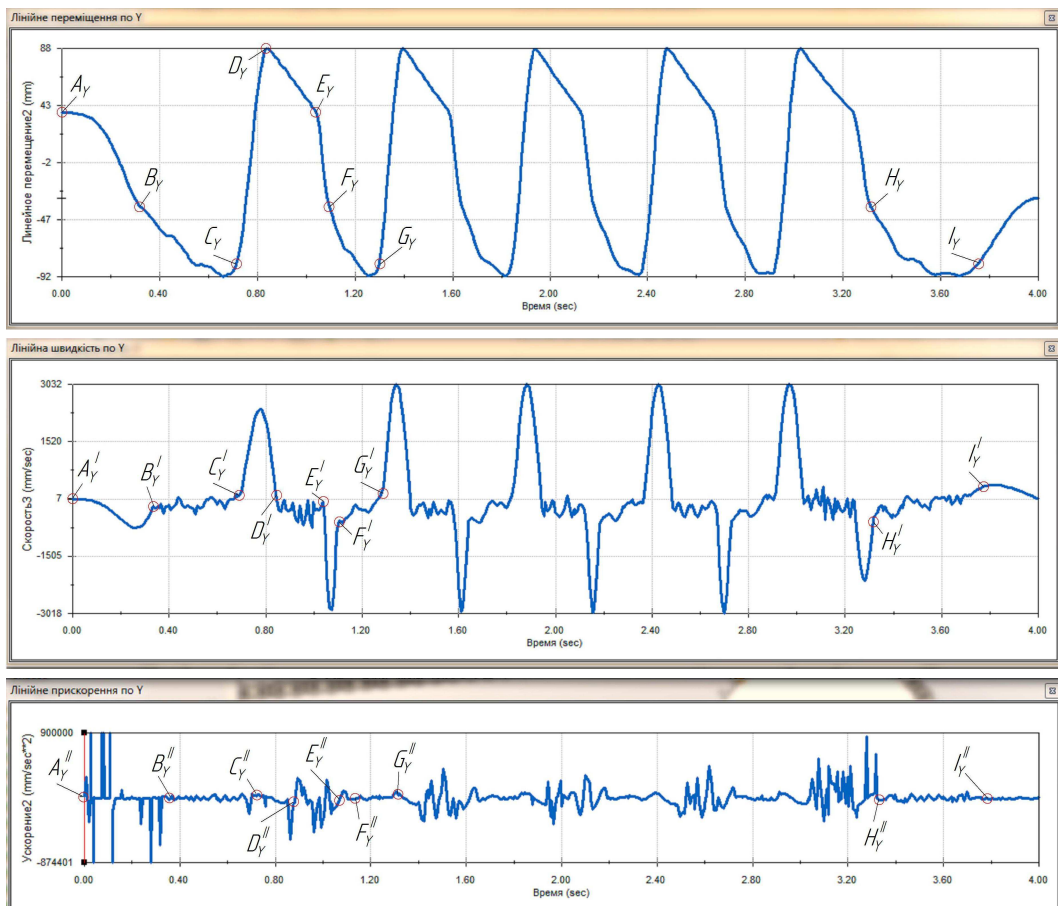


Рис. 3. Лінійні переміщення, швидкості та прискорення ролика ланцюга по осі Y

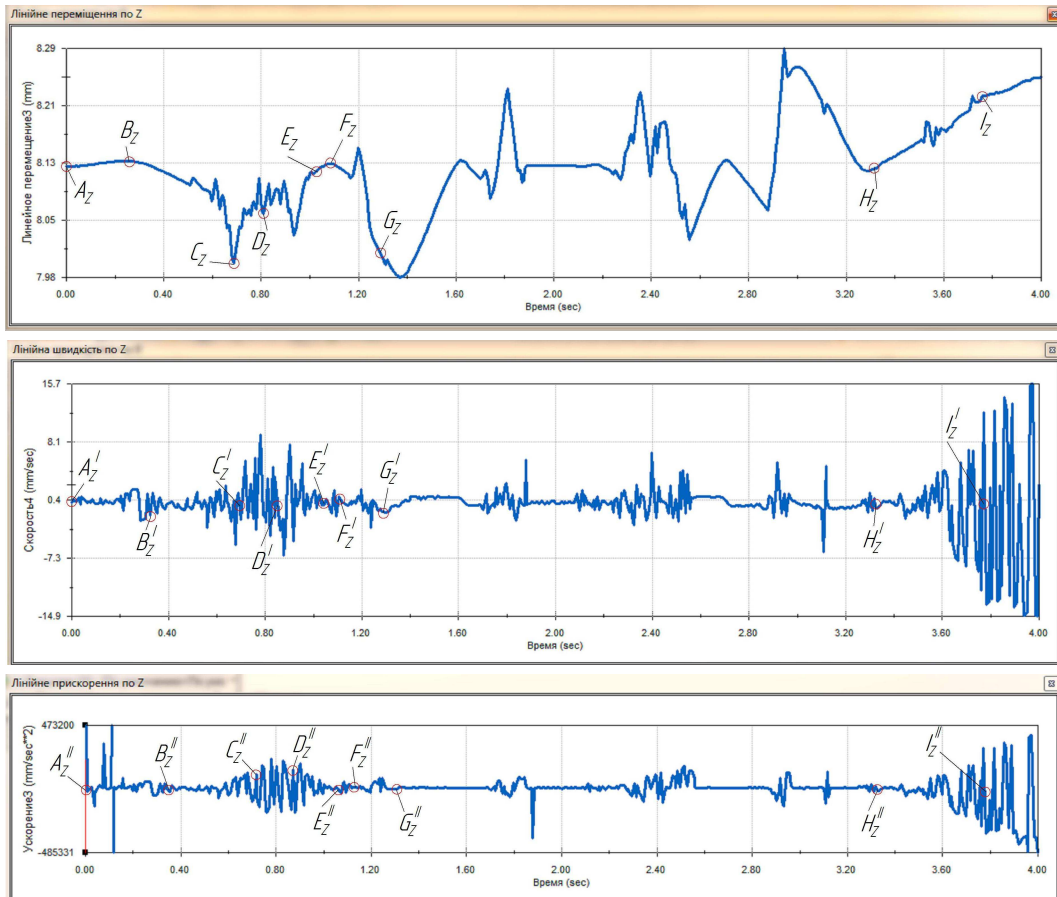


Рис. 4. Лінійні переміщення, швидкості та прискорення ролика ланцюга по осі Z

На графіках (рис. 2-4) позначені точки, які ділять криву кожного з графіків на відрізки, що характеризують розташування ролика ланцюга.

У точках $A_x, E_x, A'_x, E'_x, A''_x, E''_x, A_y, E_y, A'_y, E'_y, A''_y, E''_y, A_z, E_z, A'_z, E'_z, A''_z, E''_z$ ролик входить у зачеплення з ведучою зірочкою, а на відрізках $A_xB_x, E_xF_x, A'_xB'_x, E'_xF'_x, A''_xB''_x, E''_xF''_x, A_yB_y, E_yF_y, A'_yB'_y, E'_yF'_y, A''_yB''_y, E''_yF''_y, A_zB_z, E_zF_z, A'_zB'_z, E'_zF'_z, A''_zB''_z, E''_zF''_z$ він контактує з нею, і в точках $B_x, F_x, H_x, B'_x, F'_x, H'_x, B''_x, F''_x, H''_x, B_y, F_y, H_y, B'_y, F'_y, H'_y, B_z, F_z, H_z, B'_z, F'_z, H'_z, B''_z, F''_z, H''_z$ виходить з контакту.

На відрізках $B_xC_x, F_xG_x, H_xI_x, B'_xC'_x, F'_xG'_x, H'_xI'_x, B''_xC''_x, F''_xG''_x, H''_xI''_x, B_yC_y, F_yG_y, H_yI_y, B'_yC'_y, F'_yG'_y, H'_yI'_y, B''_yC''_y, F''_yG''_y, H''_yI''_y, B_zC_z, F_zG_z, H_zI_z, B'_zC'_z, F'_zG'_z, H'_zI'_z, B''_zC''_z, F''_zG''_z, H''_zI''_z$ ролик ланцюга переміщується по веденій вітці ланцюга, а в точках $C_x, G_x, I_x, C'_x, G'_x, I'_x, C''_x, G''_x, I''_x, C_y, G_y, I_y, C'_y, G'_y, I'_y, C''_y, G''_y, I''_y, C_z, G_z, I_z, C'_z, G'_z, I'_z, C''_z, G''_z, I''_z$ з веденої вітки ланцюгового контуру входить у зачеплення з веденою зірочкою.

На відрізках $C_xD_x, C'_xD'_x, C''_xD''_x, C_yD_y, C'_yD'_y, C''_yD''_y, C_zD_z, C'_zD'_z, C''_zD''_z$ ролик ланцюга контактує з веденою зірочкою, а в точках $D_x, D'_x, D''_x, D_y, D'_y, D''_y, D_z, D'_z, D''_z$ він виходить з контакту з веденою зірочкою.

На відрізках $D_xE_x, D'_xE'_x, D''_xE''_x, D_yE_y, D'_yE'_y, D''_yE''_y, D_zE_z, D'_zE'_z, D''_zE''_z$ ролик ланцюга переміщується по ведучій вітці ланцюга.

Криві графіків зміни лінійного переміщення, швидкості та прискорення ролика ланцюга по осях X та Y змінюються періодично при усталеному русі ланцюгової передачі (рис. 2, 3). Спостерігається також періодичність зміни кривих при усталеному русі лінійної швидкості та прискорення ролика ланцюга по осі Z (рис. 4).

З графіка лінійного переміщення ролика по осі X видно, що довжини дуг C_xD_x, E_xF_x відповідають діаметрам ведучої та веденої зірочок на шкалі часу, тобто по шкалі часу можна

судити про місцезнаходження шарніра ланцюга на ведучій та веденій зірочках. При цьому всі верхні піки кривих відповідають періодичному розташуванню ролика на веденій зірочці, а всі нижні піки – періодичному розташуванню ролика на ведучій зірочці.

На графіку лінійної швидкості ролика по осі X видно, що, проходячи по вітках ланцюгового контуру (відрізки $D'_X E'_X$ та $F'_X G'_X$), ролик ланцюга здійснює поздовжні коливання.

З графіка лінійного прискорення ролика по осі X видно, що максимальні нижні піки відповідають прискоренням ролика на ведучій зірочці, а верхні – на веденій.

На графіку лінійного переміщення ролика по осі Y видно, що довжини кривих $C_Y D_Y$, $E_Y F_Y$ є підтвердженням того, що діаметри ведучої та веденої зірочок різні. При цьому всі верхні піки кривої відповідають періодичному виходу з контакту ролика з веденою зірочкою (точка D_Y), а всі нижні піки (точка C_Y) – періодичному входженню в контакт з веденою зірочкою.

З графіка лінійної швидкості ролика по осі Y прослідковується чітко виражена періодичність коливань ролика ланцюга. Верхні піки кривої графіка відповідають розташуванню ролика ланцюга на веденій зірочці, аналогічно нижні піки – на ведучій зірочці. Амплітуди лінійних коливань ролика більші у ведучій вітці ланцюга в порівнянні з веденою. При цьому менші величини нижніх піків відповідають меншій кількості зубців ведучої зірочки, а більші величини верхніх піків відповідають більшій кількості зубців веденої зірочки.

Графік лінійного прискорення ролика по осі Y підтверджує, що амплітуди лінійних коливань ролика більші у ведучій вітці ланцюга.

Зазначимо, що програмний комплекс SolidWorks має у своєму складі розрахунок випадкових коливань. Власне графіки лінійного переміщення, швидкості та прискорення ролика ланцюга по осі Z і є відображенням цих розрахунків.

З графіка лінійного переміщення ролика по осі Z складно щось стверджувати.

Проаналізуємо більш конкретно графіки лінійної швидкості та прискорення ролика ланцюга по осі Z . На графіках швидкості та прискорення ролика (рис. 4) криві показують, що найбільше переміщення ролика виникає при контакті з веденою зірочкою в момент пуску та гальмування ланцюгової передачі.

2. Аналіз кривих зміни кутового переміщення, швидкості та прискорення ролика ланцюга по координатних осях.

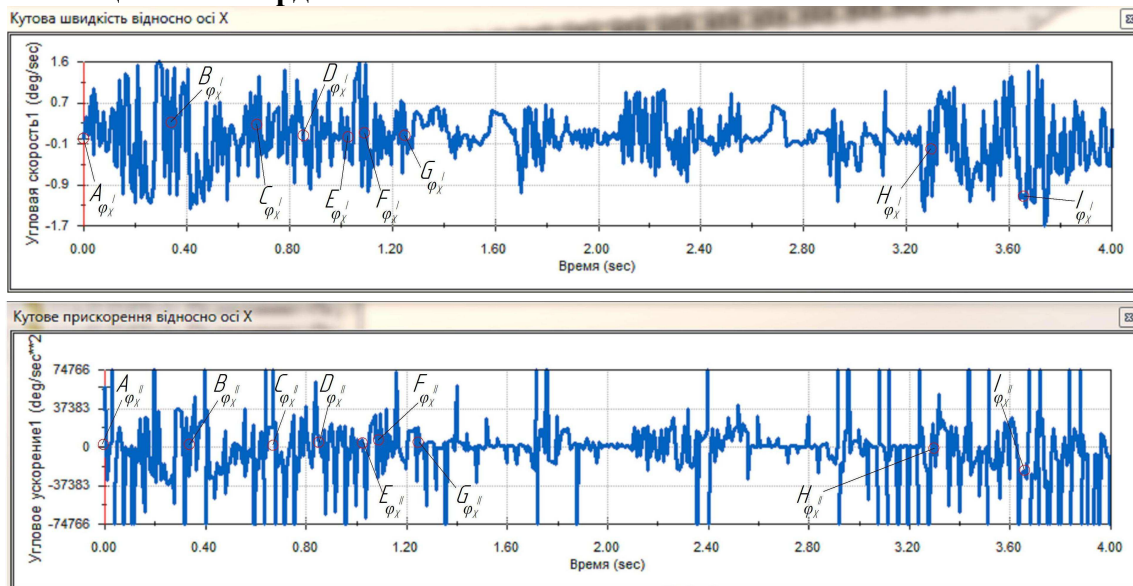


Рис. 5. Кутова швидкість та прискорення ролика ланцюга відносно осі X

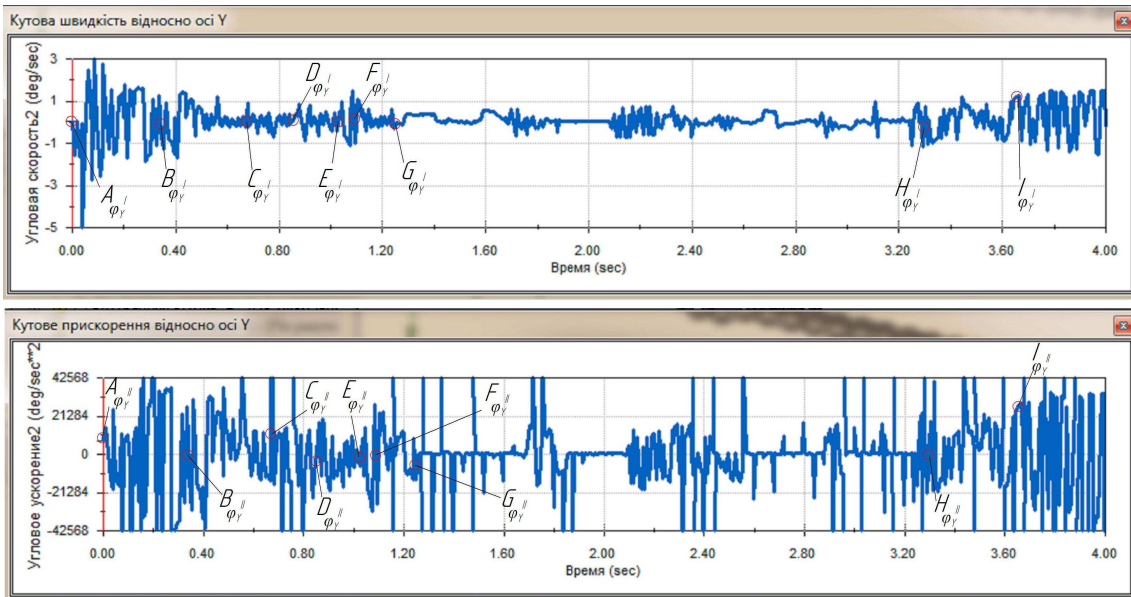


Рис. 6. Кутова швидкість та прискорення ролика ланцюга відносно осі Y

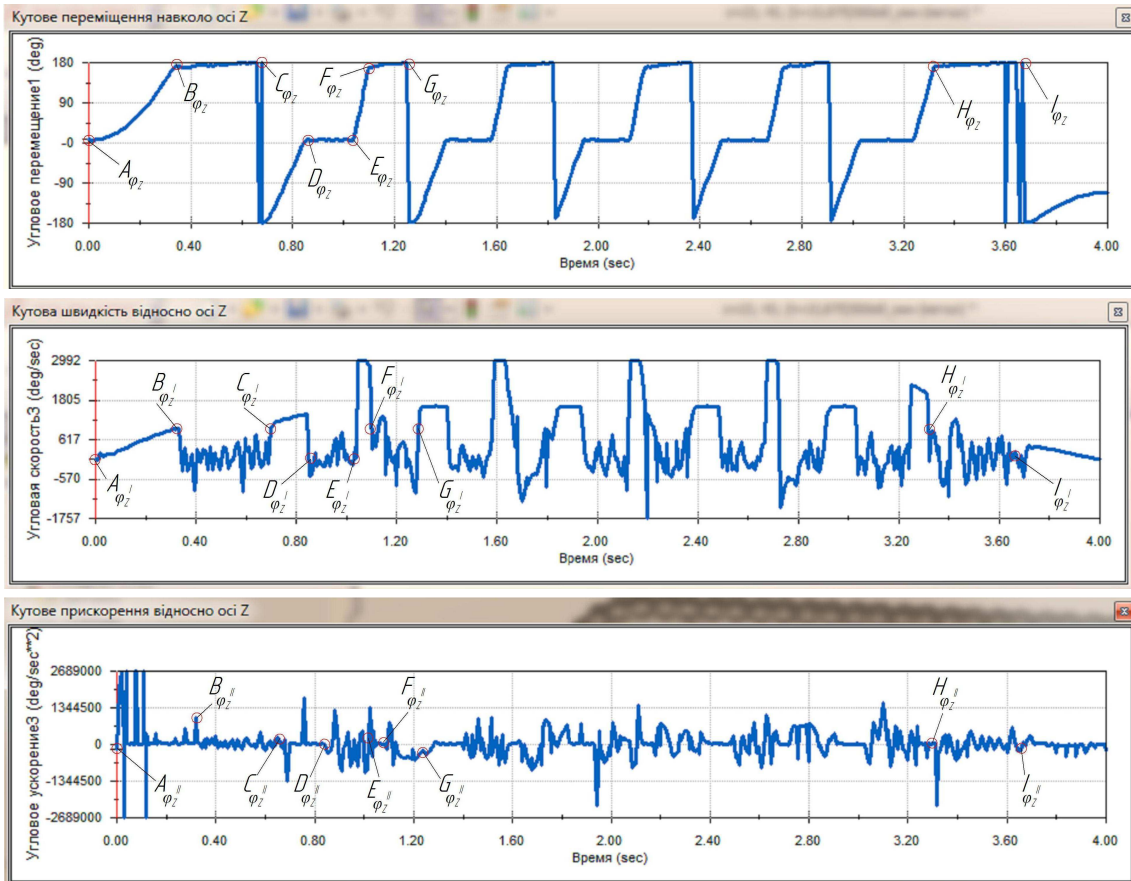


Рис. 7. Кутове переміщення, швидкість та прискорення ролика ланцюга відносно осі Z

На жаль, побудову графіків кутових переміщень відносно осей X та Y програмний комплекс SolidWorks не виконує, але виконує побудову їх швидкостей та прискорень.

На графіках (рис. 5-7) позначені точки, які ділять криву кожного з графіків на відрізки, що характеризують розташування ролика ланцюга.

У точках $A\varphi_z$, $E\varphi_z$, $A\varphi'_y$, $E\varphi'_y$, $A\varphi''_y$, $E\varphi''_y$, $A\varphi'_z$, $E\varphi'_z$, $A\varphi''_z$, $E\varphi''_z$ ролик входить у зачеплення з ведучою зірочкою, а на відрізках $A\varphi_z B\varphi_z$, $E\varphi_z F\varphi_z$, $A\varphi'_x B\varphi'_x$, $E\varphi'_x F\varphi'_x$, $A\varphi''_x B\varphi''_x$,

$E\phi''_x F\phi''_x$, $A\phi'_y B\phi'_y$, $E\phi'_y F\phi'_y$, $A\phi''_y B\phi''_y$, $E\phi''_y F\phi''_y$, $A\phi'_z B\phi'_z$, $E\phi'_z F\phi'_z$, $A\phi''_z B\phi''_z$, $E\phi''_z F\phi''_z$ контактує з нею.

У точках $B\phi_z$, $F\phi_z$, $B\phi'_x$, $F\phi'_x$, $B\phi''_x$, $F\phi''_x$, $B\phi'_y$, $F\phi'_y$, $B\phi''_y$, $F\phi''_y$, $B\phi'_z$, $F\phi'_z$, $B\phi''_z$, $F\phi''_z$ ролик виходить з контакту з ведучою зірочкою, на відрізках $B\phi_z C\phi_z$, $F\phi_z G\phi_z$, $H\phi_z I\phi_z$, $B\phi'_x C\phi'_x$, $F\phi'_x G\phi'_x$, $H\phi'_x I\phi'_x$, $B\phi''_x C\phi''_x$, $F\phi''_x G\phi''_x$, $H\phi''_x I\phi''_x$, $B\phi'_y C\phi'_y$, $F\phi'_y G\phi'_y$, $H\phi'_y I\phi'_y$, $B\phi''_y C\phi''_y$, $F\phi''_y G\phi''_y$, $H\phi''_y I\phi''_y$, $B\phi'_z C\phi'_z$, $F\phi'_z G\phi'_z$, $H\phi'_z I\phi'_z$, $B\phi''_z C\phi''_z$, $F\phi''_z G\phi''_z$, $H\phi''_z I\phi''_z$ переміщується по веденій вітці ланцюга, і в точках $C\phi_z$, $G\phi_z$, $I\phi_z$, $C\phi'_x$, $G\phi'_x$, $I\phi'_x$, $C\phi''_x$, $G\phi''_x$, $I\phi''_x$, $C\phi'_y$, $G\phi'_y$, $I\phi'_y$, $C\phi''_y$, $G\phi''_y$, $I\phi''_y$, $C\phi'_z$, $G\phi'_z$, $I\phi'_z$, $C\phi''_z$, $G\phi''_z$, $I\phi''_z$ ролик з веденої вітки ланцюгового контуру входить у зачеплення з веденою зірочкою.

На відрізках $C\phi_z D\phi_z$, $C\phi'_x D\phi'_x$, $C\phi''_x D\phi''_x$, $C\phi'_y D\phi'_y$, $C\phi''_y D\phi''_y$, $C\phi'_z D\phi'_z$, $C\phi''_z D\phi''_z$ ролик ланцюга контактує з веденою зірочкою, а в точках $D\phi_z$, $D\phi'_x$, $D\phi''_x$, $D\phi'_y$, $D\phi''_y$, $D\phi'_z$, $D\phi''_z$ виходить з контакту з нею.

На відрізках $D\phi_z E\phi_z$, $D\phi'_x E\phi'_x$, $D\phi''_x E\phi''_x$, $D\phi'_y E\phi'_y$, $D\phi''_y E\phi''_y$, $D\phi'_z E\phi'_z$, $D\phi''_z E\phi''_z$ ролик ланцюга переміщується по ведучій вітці ланцюга.

Розглянувши криві графіків кутових швидкостей та прискорень ролика відносно осей X та Y (рис. 5, 6), складно їх аналізувати, оскільки вони не описують чіткої закономірності зміни руху та є випадковими коливаннями відносно вказаних осей.

Аналізуючи графіки кутового переміщення та швидкості ролика відносно осі Z , бачимо, що прослідковується їх періодичність при усталеному русі ланцюгової передачі.

На графіку кутового переміщення ролика відносно осі Z спостерігаються різкі зміни кута набігання ролика на ведену зірочку в моменти пуску та гальмування ланцюгової передачі. Це свідчить про обертання ролика ланцюга навколо власної осі.

Розглядаючи криві графіків кутової швидкості та прискорення ролика відносно осі Z , спостерігаються більші амплітуди коливань ролика ланцюга, коли він переміщується по веденій вітці, в порівнянні з ведучою віткою ланцюга.

Проаналізувавши графіки (рис. 2-7) комплексно, можна стверджувати, що в різні періоди часу під час руху ролик ланцюга поводить себе неоднаково. Коли в механічній системі настає режим усталеного руху з постійною швидкістю, то починає прослідковуватися характер поведіння ролика ланцюга з часом. Він рухається періодично, виникають певні коливання ролика, коли він контактує із зірочками та знаходиться у ведучій та веденій вітках ланцюга.

Зауважимо, що була побудована анімаційна 3D-модель ланцюгової передачі, з якої був зроблений представлений аналіз. На жаль, рис. 1 не повною мірою відображає реальну картину руху ролика ланцюгового контуру.

Висновки. У результаті побудови 3D-моделі ланцюгової передачі та аналізу динаміки руху ролика ланцюга відносно координатних осей за допомогою програмного продукту SolidWorks можна стверджувати, що:

- криві графіків зміни лінійного переміщення, швидкості та прискорення ролика ланцюга по осях X та Y , а також лінійної швидкості та прискорення по осі Z змінюються періодично при усталеному русі ланцюгової передачі;

- проходячи по вітках ланцюгового контуру, ролик ланцюга здійснює поздовжні коливання відповідно по кожній з осей;

- амплітуди лінійних коливань ролика більші у ведучій вітці ланцюга в порівнянні з веденою;

- при кутовому переміщенні ролика відносно осі Z спостерігається різка зміна кута набігання ролика на ведену зірочку в моменти пуску та гальмування ланцюгової передачі, що свідчить про обертання ролика ланцюга навколо власної осі;

- амплітуди кутових коливань ролика менші у ведучій вітці ланцюга в порівнянні з веденою.

Список використаних джерел

1. *Алямовский А. А.* COSMOSWorks. Основы расчёта конструкций на прочность в среде SolidWorks / А. А. Алямовский. – М. : ДМК-Пресс, 2010. – 789 с.
2. *Paul M. Kurowski.* Engineering. Analysis with COSMOSWorks Professional. – Schroff Development Corporation (SDC), 2005. – 248 p.
3. *Кудрявцев Е. М.* КОМПАС-3D V10. Максимально полное руководство : в 3-х томах / Е. М. Кудрявцев. – М. : ДМК-Пресс, 2008. – 1184 с.
4. *Воробьев Н. В.* Цепные передачи. Машиностроение / Н. В. Воробьев. – М., 1968. – 252 с.
5. *Rachner H. G.* Stahlgelenkketten und Kettentriebe / Н. G. Rachner. – Berlin, 1962. – 221 s.
6. *Пилипенко О. И.* Научные основы и синтез цепных передач : дис. д-ра техн. наук / О. И. Пилипенко. – Х., 1996. – 467 с.
7. *Режим* доступу : <http://help.solidworks.com>.