

УДК 621.83.062

Р.В. Амбарцумянц, д-р техн. наук, проф.,
М.І. Субботіна, канд. техн. наук, доц.

Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна, 112, 65039 Одеса, Україна; e-mail: subbotina@ukr.net

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ РУХУ ЛАНОК ІМПУЛЬСНОГО РЕДУКТОРА НОВОЇ КОМПАКТНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

Р.В. Амбарцумянц, М.І. Субботіна. Дослідження динаміки руху ланок імпульсного редуктора нової компактною конструкції. Імпульсні редуктори дозволяють забезпечити переривчастий або безупинний з заданою нерівномірністю рух при великих передаточних відношеннях. Метою є динамічні дослідження нової компактною конструкції імпульсного редуктора. Розроблено математичну модель редуктора, яка складається з трьох систем диференціальних рівнянь руху, що зв'язані між собою часовими параметрами як границями інтегрування відповідних періодів руху ланок. Особливість складання математичної моделі даної конструкції редуктора як передачі зі змінною структурою протягом циклу міститься у співпадінні періодів спільного руху обойм одного з механізмів вільного ходу та незалежного руху обойм другого. Дослідження динаміки циклу руху ланок редуктора проведені для послідовних періодів заклинювання механізмів вільного ходу, спільного руху обойм і їх незалежного руху. Визначено динамічні характеристики і закони руху ланок редуктора. На основі математичної моделі редуктора стає можливим чисельний аналіз впливу конструктивних і інерційних характеристик на динамічні характеристики імпульсного редуктора даної конструкції.

Ключові слова: механізм вільного руху, динаміка руху, механізм змінної структури, нерівномірний рух.

R.V. Ambartsumyants, M.I. Subbotina. Researching the links' motion dynamics of new compact pulse reducer design. Pulse reducers provide intermittent motion or continuous movement with predetermined non-uniformity and high reduction ratio. The aim of the research is to study the dynamics of new compact construction of pulse reducer. Reducer's mathematical model consisting of three systems of differential equations is developed. Systems of equations are related to each other through temporal parameters as integration limits on corresponding periods of links movement. Feature of mathematical model developing of this design reducer as a transmission with variable structure during the cycle is in coincidence of periods of holders joint motion for one freewheeling mechanism (FWM) and in independent motion of holders for another FWM. Movement dynamics research of pulse reducer links are conducted for successive periods of FWM's jamming, for joint motion of holders and their independent movement. Dynamic characteristics and law of motion of reducer's links are defined. Numerical analysis of construction and inertial characteristics and their impact on reducer's dynamic characteristics became possible on the basis of developed mathematical model.

Keywords: freewheeling mechanism, motion dynamics, mechanisms of variable structure, non-uniform motion.

Вступ. В різноманітних галузях промисловості використовують технологічне обладнання, в якому необхідною є невелика швидкість його руху з заданою нерівномірністю або замалі швидкості руху робочого органа, наприклад: у виноробстві у приводах пресів при обертанні шнека з заданою нерівномірністю, у будівництві у приводах ковзаючої опалубки при бетонуванні (3...5 м за добу) і т.д.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільш ефективними у таких приводах є імпульсні редуктори, які дозволяють забезпечити переривчастий рух і безупинний з заданою нерівномірністю руху при великих (100...1000 і більших) значеннях передаточного відношення [1]. Використання для цієї мети багатоступінчастих зубчастих передач призводить до зростання маси і габаритних розмірів передачі, а використання черв'ячних передач — до суттєвого збільшення втрат на тертя до 40...50 %.

Метою є дослідження компактною конструкції імпульсного редуктора [2], яка дозволяє отримати великі передаточні відношення, а також підвищити ККД передачі, її надійність та довговічність.

DOI 10.15276/opu.2.46.2015.11

© 2015 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Викладення основного матеріалу. До складу редуктора входять кулісний важільний механізм, конструктивно взаємозв'язані з ним дві зубчасті рейки, що взаємодіють з двома механізмами вільного ходу (МВХ). Таке конструктивне виконання імпульсного редуктора збільшує кількість імпульсів за один зворот провідного валу, що призводить до зменшення коливань кутової швидкості веденого валу, і тим самим до зменшення нерівномірності обертання веденого валу. Кінематична схема імпульсного редуктора представлена на рис. 1.

Функція положення складного перетворюючого механізму редуктора (куліса) [3] має вигляд при $0 \leq \varphi \leq \pi$

$$\Phi = \frac{r-1 + \sqrt{(1-r \cos \varphi)^2 + r^2 \sin^2 \varphi}}{R}, \quad (1)$$

при $\pi \leq \varphi \leq 2\pi$

$$\Phi = \frac{2r}{R} + \frac{r-1 + \sqrt{(1+r \cos \varphi)^2 + r^2 \sin^2 \varphi}}{R}, \quad (2)$$

де φ — кут повороту вхідної ланки;

r_1 — довжина кривошипу;

r — відносна довжина кривошипу, $r = r_1/a$;

a — міжосьова відстань;

R_1 — радіус діляльного кола зубчастого вінця зовнішньої обойми МВХ;

R — відносний радіус діляльного кола зубчастого вінця зовнішньої обойми МВХ, $R = R_1/a$.

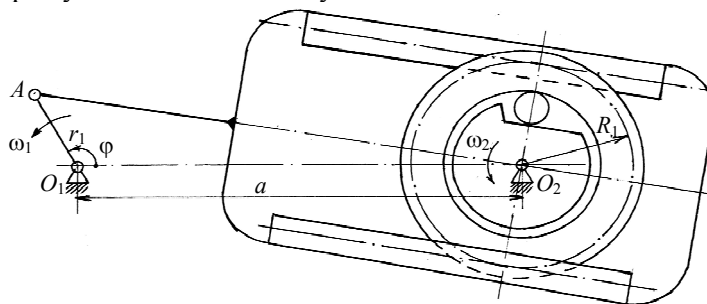


Рис. 1. Кінематична схема імпульсного редуктора

Особливістю імпульсних передач є змінність структури протягом циклу. Для здійснення необхідного закону руху веденого валу імпульсного редуктора (закону руху робочого органа машини) необхідне знання законів руху його ланок протягом одного циклу t_c . Дослідження динаміки руху ланок протягом повного циклу виконується для імпульсного редуктора з одним перетворюючим механізмом і двома МВХ. Цикл руху ланок імпульсного редуктора являє собою сукупність таких періодів: періоду заклинювання МВХ, періоду спільного руху обойм МВХ, періоду їх незалежного руху. Але особливість складання математичної моделі даної схеми міститься у співпаданні періоду спільного руху обойм одного з МВХ і періоду незалежного руху обойм другого МВХ. Характерними моментами при циклічному русі вихідної ланки редуктора є наступні: час закінчення заклинювання ланок МВХ t_z , час початку процесу вибігу веденої ланки МВХ t_v , час початку чергового циклу руху t_{nc} .

Динамічний процес, який відбувається в імпульсному редукторі як двомасовій системі, у перші два періоди описується з урахуванням пружності МВХ при постійних моментах інерції системою диференціальних рівнянь

$$\begin{aligned} [I_1 + I_2(\Phi')^2] \ddot{\varphi} + I_2 \Phi' \Phi'' \dot{\varphi}^2 - I_2 \Phi' \ddot{\xi} &= T_d - T_c \Phi' \\ -I_2(\Phi' \ddot{\varphi} + \Phi'' \dot{\varphi}^2 - \ddot{\xi}) + \lambda(\xi) A \xi &= T_c \end{aligned} \quad (3)$$

де ψ — кут повороту веденого вала;

$$\Phi' = d\Phi/d\varphi;$$

$$\Phi'' = d^2\Phi/d\varphi^2;$$

ξ — кут відносного повороту обойм МВХ, $\xi = \Phi - \psi$;

I_1 — приведений до вихідного вала двигуна момент інерції ведучої підсистеми, що включає ротор двигуна, перетворюючий механізм і ведучу ланку МВХ;

I_2 — приведений до веденої ланки МВХ момент інерції веденої підсистеми, яка складається з веденої ланки МВХ і виконавчого механізму;

Φ — функція положення перетворюючого механізму, $\Phi = \Phi(\varphi)$;

A — жорсткість МВХ;

$$\lambda(\xi) = \begin{cases} 0, & \xi \leq 0 \\ 1, & \xi > 0 \end{cases} \text{ — асиметрична одинична функція;}$$

T_d — рушійний момент, прикладений до ротора двигуна;

T_c — момент зовнішніх сил, приведений до вихідної ланки редуктора.

Динамічне дослідження повного циклу руху ланок імпульсного редуктора і складання математичної моделі імпульсного редуктора, яка розв'язується чисельними методами, проводимо відповідно до методики, запропонованої у роботі [4]. Досліджуваний редуктор включає до себе два МВХ, тому функції положення куліси Φ (1), (2) та аналоги її кутової швидкості Φ' і кутового прискорення Φ'' мають додаткові точки розриву. У зв'язку з тим, що досліджується стабільний режим, обмежимося статичною характеристикою електродвигуна

$$T_d = a_d - b_d \dot{\varphi},$$

де a_d, b_d — характеристики електропривода.

При чисельному розв'язанні системи розглянемо варіант навантаження $T_c = \text{const}$. Вважаємо, що коливання кутової швидкості ведучого вала не впливають на функцію положення $\Phi(\varphi)$, тобто, при номінальній швидкості ω_n вала двигуна $\varphi = \omega_n \cdot t$.

По закінченні заклинювання кут відносного повороту обойм досягає максимуму ξ_{\max} , з цього моменту t_z — відсутній відносний рух ланок МВХ, і основною умовою завершення періоду заклинювання при розв'язанні рівнянь (3) є умова

$$\dot{\xi} \leq 0.$$

Період незалежного руху ланок МВХ описується рівнянням руху ведучої обойми

$$I_1 \ddot{\varphi} = a_d - b_d \dot{\varphi}$$

і рівнянням руху веденої обойми

$$I_2 \ddot{\psi} = T_c. \quad (4)$$

У випадку розвитку руху, коли ведена обойма обганяє ведучу обойму МВХ, настає так званий вибіг веденої обойми. Рівняння (3) і (4) дозволяють знайти момент початку вибігу t_v веденої системи. Якщо в інтервалі спаду аналога швидкості Φ' виконується нерівність аналогів кутових прискорень

$$|\ddot{\psi}| < |\ddot{\Phi}|_{\max},$$

то відтворюється вибіг МВХ. Інакше вибіг відсутній.

Якщо існує вибіг веденого вала, то момент початку сумісного обертання обойм другого МВХ t_{nc} відшукується на інтервалі часу другої половини циклу руху редуктора — у період робочого ходу другого МВХ. Величина часу t_{nc} є розв'язком рівняння

$$\dot{\Phi}(t) = \dot{\psi}(t).$$

Для розв'язання комплексу систем диференціальних рівнянь чисельними методами застосовується алгоритм розрахунку [4]. Програма розрахунку циклу руху імпульсного редуктора реалізована за допомогою математичного апарату MathCAD. Для систем неоднорідних лінійних диференціальних рівнянь другого порядку задача Коші розв'язується методом Рунге–Кутта.

Результати. Математична модель редуктора, що представляється, дозволила варіювати конструктивні розміри створеної нової конструкції редуктора і досліджувати відповідні зміни в законі руху веденого вала. В процесі відладки програми розрахунку і апробації математичної моделі проводилися перевірки різних комбінацій розмірів ланок запатентованої конструкції і їх впливу на динаміку руху. Розрахунки підтвердили можливість функціонування запропонованої конструкції в різних режимах: нерівномірного руху веденого вала як за відсутності вибігу веденої обойми MBX, так і у режимі, що супроводжується вибігом, а також руху з періодичними зупинками. Дослідження показало, що модель, яка враховує вплив пружності MBX, дає можливість встановити інтервали зміни ряду параметрів, при яких редуктор може експлуатуватися в заданих умовах.

Результати розрахунку наведені для випадку нерівномірного руху вихідного вала редуктора, який супроводжується вибігом веденої обойми MBX. При цьому використані такі вихідні дані: $A=2877$ Н·м/рад; $I_1=0,014$ кг·м²; $I_2=0,05$ кг·м²; $r_1=0,005$ м; $R_1=0,25$ м; $a_d=230$ Н·м; $b_d=2,35$ Н·м·с; $\omega=97$ рад/с. Визначені: $t_c=0,065$ с; $t_z=0,014$ с; $t_v=0,021$ с; $t_{nc}=0,038$ с; $\xi_{\max}=0,012$ рад; закон зміни кутів ψ , Φ і ξ (рис. 2) і закон зміни кутової швидкості веденого вала редуктора ($\dot{\psi} \cdot \omega$) та кутової швидкості ведучих обойм MBX ($\dot{\Phi} \cdot \omega$) (рис. 3).

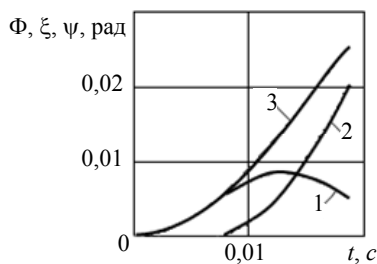


Рис. 2. Зміна відносного кута повороту обойми MBX ξ (1); кута повороту веденого вала ψ (2); кута повороту куліси і ведучої обойми MBX Φ (3)

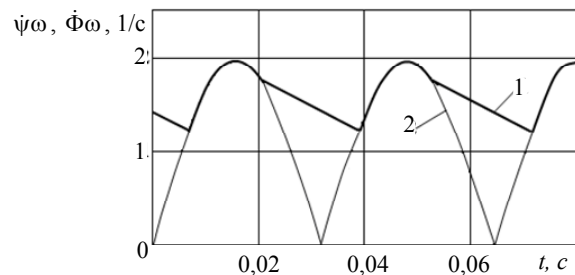


Рис. 3. Зміна кутової швидкості веденого вала ($\dot{\psi}\omega$) (1) і кутової швидкості ведучих обойм MBX редуктора ($\dot{\Phi}\omega$) (2)

Висновки. Виконані дослідження динаміки дозволили розробити математичну модель імпульсного редуктора нової конструкції, яка складається з трьох систем диференціальних рівнянь руху другого порядку, що зв'язані між собою часовими характеристиками як границями інтегрування відповідних періодів руху ланок.

На основі отриманої математичної моделі редуктора стає можливим чисельний аналіз впливу конструктивних розмірів ланок, інерційних характеристик на динамічні характеристики імпульсного редуктора даної конструкції.

Література

1. Архангельский, Г.В. Импульсные редукторы / Г.В. Архангельский. — Одесса: Наука и техника, 2009. — 76 с.
2. Пат. 63938 Україна, МПК F16H 29/00. Импульсный редуктор / Амбарцумянц Р.В., Субботіна М.І.; заявник та патентовласник Одеська національна академія харчових технологій. — № u201103684; заявл. 28.03.2011; надр. 25.10.2011; Бюл. № 20.
3. Амбарцумянц, Р.В. Кинематический анализ импульсного редуктора / Р.В. Амбарцумянц, М.И. Субботина // Вісн. Хмельниц. нац. ун-ту. Техн. науки. — 2013. — № 1. — С. 21 — 23.

-
4. Субботіна, М.І. Динамічне дослідження циклу руху ланок імпульсного редуктора / М.І. Субботіна // Наук. пр. ОНАХТ. — 2003. — Вип. 26. — С. 228 — 232.

References

1. Arkhangelsky, G.V. (2009). *Pulse Reducers*. Odessa: Nauka i Tekhnika.
2. Odesa National Academy of Food Technologies. (2011). *Pulse Reducer*. Ukraine Patent: UA 63938.
3. Ambartsumyants, R.V. and Subbotina, M.I. (2013). The kinematic analysis of pulse reducer. *Herald of Khmelnytskyi national university. Technical sciences*, 1, 21-23.
4. Subbotina, M.I. (2003). Dynamical study of movement cycle of pulse reducers' elements. *Research Works of ONAFT*, 26, 228-232.

Надійшла до редакції 10 березня 2015 р.