

1957 гг.). – К. : Здоровье, 1964. – С. 39–46. **2. Четаева В. Г.** Детский ортопедический профилакторий / В. Г. Четаева, Н. Д. Мацкевич // 50 лет научной, лечебной и организационной деятельности Украинского научно-исследовательского института ортопедии и травматологии им. проф. М. И. Ситенко (1907–1957 гг.). – К. : Здоровье, 1964. – С. 76–80. **3. Рудаев В. А.** Трудовой ортопедический профилакторий / В. А. Рудаев // / 50 лет научной, лечебной и организационной деятельности Украинского научно-исследовательского института ортопедии и травматологии им. проф. М. И. Ситенко (1907–1957 гг.). – Киев : Здоровье, 1964. – С. 80–86. **4. Кондрашин Н. И.** Роль Харьковского НИИ ортопедии и травматологии им. проф. М. И. Ситенко в развитии отечественного протезирования и ортезирования (к 80-летию со дня основания института) / Н. И. Кондрашин, Д. А. Яременко // Ортопедия, травматология и протезирование. – 1988. – № 1. – С. 71–74. **5. Корж Н. А.** Вклад Института им. проф. М. И. Ситенко в становление и развитие протезно-ортопедической помощи в Украине / Н. А. Корж, Д. А. Яременко, И. В. Голубева // Ортопедия, травматология и протезирование. – 2005. – № 2. – С. 130–135. **6. Исторический очерк об Институте патологии позвоночника и суставов имени профессора М. И. Ситенко АМН Украины: к 100-летию со дня основания** // [Н. А. Корж, Д. А. Яременко, В. Б. Таршис, Е. Г. Шевченко, И. В. Голубева]; под ред. проф. Н. А. Коржа и проф. Д. А. Яременко. – Харьков : ИППС им. проф. М. И. Ситенко АМН Украины, 2007. – 214 с. **7. Тимченко И. Б.** Основные этапы ортезирования в Институте им. проф. М. И. Ситенко / И. Б. Тимченко, А. А. Дынный // Ортопедия, травматология и протезирование. – 2008. – № 2. – С. 127–133. **8. Костриков В. С.** Михаил Иванович Ситенко / В. С. Костриков, А. Н. Скоблин: [под ред. проф. Н. П. Новаченко]. – Х. : Харьковское областное издательство, 1958. – 103 с. **9. Корж А. А.** Михаил Иванович Ситенко (К 120-летию со дня рождения) // Ортопедия, травматология и протезирование. – 2005. – № 3. – С. 108–112. **10. Ситенко М. И.** О роли ортопедии в системе советского здравоохранения и об основных принципах организации ортопедической помощи / М. И. Ситенко. Ортопедия и травматология: избранные труды. – Киев : Наукова думка, 1991. – С. 17–24. **11. Ситенко М. И.** Задачи и пути борьбы с увечностью и калечеством / М. И. Ситенко. Ортопедия и травматология: избранные труды. – Киев : Наукова думка, 1991. – С. 27–32. **12. Ситенко М. И.** Исторические пути развития и современное состояние ортопедии // М. И. Ситенко. Ортопедия и травматология: избранные труды. – Киев : Наукова думка, 1991. – С. 8–17. **13. Остапко К. І.** Мета й завдання ортопедичного трудового профілакторію / К. І. Остапко // Ортопедичний трудовий профілакторій: [Народний комісаріат соціального забезпечення УРСР]. – Київ : Державне видавництво УРСР, 1938. – С. 7–18. **14. Протезное дело:** краткое руководство для протезных техников / Ортопедический трудовой профилакторий Народного комиссариата социального обеспечения УССР. – Харьков, 1941. – 327 с.

*Надійшла до редколегії 14.10.11*

УДК 62-233.3; 629.76-531.7

**Є. В. ГОРБЕНКО**, Дніпропетровський національний університет

## **ВИКОРИСТАННЯ ХВИЛЬОВИХ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ У РАКЕТНО-КОСМІЧНІЙ ГАЛУЗІ**

Розглянуто процес розвитку дослідження та впровадження хвильових зубчастих передач, починаючи з середини ХХ століття. Окреслено коло науково-технічних і виробничих організацій, які займалися вивченням і впровадженням хвильових зубчастих передач у ракетно-космічній галузі.

Рассмотрен процесс развития исследований и внедрения волновых зубчатых передач, начиная с середины ХХ века. Очерчен круг научно-технических и производственных организаций, которые занимались изучением и внедрением волновых зубчатых передач в ракетно-космической области.

This article is considering the improvement of the schematic of the wave gear since the XX century. Outline a range of scientific, technical and industrial organizations that are engaged in studying and implementing.

Хвильова передача – механічна передача (зубчаста, фрикційна, гвинтова), в якій обертання передається і перетворюється циклічним збудженням хвиль деформації в так званому гнучкому елементі. Винахідник хвильової передачі – американський інженер У. Массер (1959).

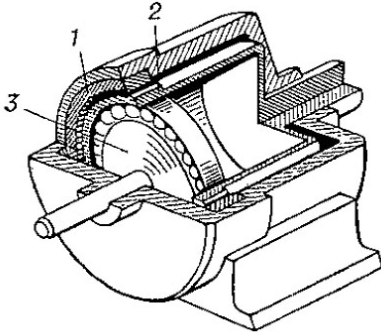


Рис. 1. Зубчаста хвильова передача:  
1 – жорстке колесо; 2 – гнучке колесо; 3 – генератор хвиль

Переваги хвильових передач порівняно зі звичайними зубчастими передачами полягають в наступному: можливості з'єднувати частини конструкції, які розташовані в різних середовищах; меншій масі та габаритних розмірах; високій демпфуючій здатності, меншому шумові; дозволяє здійснити великі передавальні відносини в одному щаблі. Хвильова передача застосовуються в різних галузях техніки, зокрема в авіаційній і космічній, у точних приладах, виконавчих механізмах систем з дистанційним і автоматичним управлінням, у приводах радарних антен систем спостереження за космічними об'єктами, у приводах вантажопідіймальних машин, конвеєрів, різних верстатів.

**Метою цієї роботи** є аналіз процесу дослідження та впровадження хвильових зубчастих передач. Розкрито основні напрями діяльності підприємств, на яких проводилися роботи з виготовлення цих передач, та об'єктів, на яких вони були встановленні.

За останні роки проведено значний обсяг досліджень хвильових передач і накопичено досвід їхньої експлуатації у промисловості. Можна стверджувати, що в окремих випадках (велике передаточне відношення, великі навантаження, передача руху в герметизований простір, підвищена

кінематична точність) хвильові передачі мають істотні техніко-економічні переваги перед іншими видами передач.

Герметичні хвильові передачі передають обертання в герметизовані порожнини з агресивним хімічним і радіоактивним середовищем, у порожнини з високим тиском і глибоким вакуумом, а також є приводами герметичних вентилів. Зокрема в американській космічній ракеті «Кентавр» (60-і рр. ХХ ст.) герметична хвильова передача була використана в механізмі вентиля системи рідкого кисню, що виключило витік кисню і підвищило вибухо- та пожежобезпеку.

Відома значна кількість досліджень зубчастих зачеплень у хвильових передачах [1–5]. В одних розглядають хвильове зачеплення як найбільш загальний випадок зубчастого зачеплення, в інших – як клиновий механізм зі складним відносним рухом ланок. У роботах Н. І. Цейтліна, Е. М. Цукермана уточнено розрахунки зачеплення зубів хвильової передачі, що ґрунтується на теорії клинових механізмів, проводиться рахунок більш повного переміщення зубів гнучкого колеса [6]. Розрахунками гнучкого колеса займалися також Н. В. Гварамадзе, О. І. Крахін, Н. В. Валішвілі, В. Б. Силкін [7].

Виготовленням та впровадженням хвильових зубчастих передач у ХХ ст. займалися такі підприємства як Київський дослідно-показовий редукторний завод, Ленінградська військово-інженерна академія ім. А. Ф. Можайського, Красноярський політехнічний інститут, Московське вище технічне училище ім. М. Е. Баумана, Московський верстатострументальний інститут, Конструкторське бюро (КБ) «Південне».

Застосування хвильових зубчастих передач в ракетно-космічній техніці зумовлено тим, що лише в цьому типі зубчастої передачі можливо здійснити передачу обертання валів, встановлених у різних середовищах, а саме в газовому середовищі і в умовах космічного вакууму. Тому в КБ «Південне» хвильові передачі були застосовані на супутниках «Цілина-2», «Океан-О», а також у приводі газового керна ракети «Циклон». Супутник «Цілина-2» (1980–1984 рр.) призначався для оглядових і детальних радіотехнічних спостережень за цільовим завданням Міністерства оборони та Міністерства радіопромисловості СРСР. Космічний апарат «Океан-О» (1986–1994 рр.) використовувався для вивчення Світового океану та суходолу в інтересах народного господарства та наук про Землю. Він забезпечував глобальну оптичну та мікрохвильову зйомку з низьким, середнім і високим дозволом.

На фізико-технічному факультеті (ФТФ) Дніпропетровського університету дослідженнями хвильових зубчастих передач займався Дудніков Володимир Степанович. Він захистив кандидатську дисертацію «Розробка методу розрахунку на міцність і дослідження тонкостінних конструкцій хвильових зубчастих передач приводів літальних апаратів» [8].

Роботи на ФТФ велися з 1971 р. до 1988 р. і були отримані такі результати: 1) Розроблено методику визначення: напружено-деформованого стану тонкої циліндричної оболонки, навантаженої на одному кінці системою

трьох розподілених зусиль і моментів; напружено-деформованого стану розтяжного кільця при його просторовому вигині; напружено-деформованого стану гнучкого колеса хвильової передачі, представленого у вигляді двох циліндричних оболонок, що стиковані за паралельними колами через пружне кільце. 2) Спроековано конструкцію експериментальної установки для моделювання навантаження оболонок хвильових передач генератором деформацій, методику проведення експериментальних досліджень з оцінки впливу розмірів і форм елементів гнучких коліс на їхній напружено-деформований стан. Проведено розрахунково-експериментальні дослідження напружено-деформованого стану гнучких коліс різних конструкцій, форм, розмірів. 3) Запропоновано низку конструктивних удосконалень, що знижували рівень напруженого стану, визнані винаходами. 4) Розроблено рекомендації з проектування хвильових передач приводів літальних апаратів. За результатами досліджень опубліковано 10 статей, 14 тез, отримано 11 авторських свідоцтв на винаходи.

У 1987 р. на ФТФ під керівництвом к.т.н., доцента Д. І. Єременко В. А. Засць захистила кандидатську дисертацію «Аналіз втрат потужності в хвильовій зубчастій передачі». Розрахунком перехідних процесів при початку роботи хвильових передач займалася О. М. Осипова. За цією темою вона захистила кандидатську дисертацію під керівництвом професора фізико-технічного факультету Дніпропетровського державного університету І. К. Коська. Дослідження О. М. Осипової дозволили зробити визначення динамічних навантажень у гнучкому колесі хвильової зубчастої передачі, що дозволила забезпечити надійне функціонування приводів космічних літальних апаратів.

Тривалість роботи хвильової передачі значною мірою залежить від правильного вибору параметрів гнучкого колеса, для визначення яких необхідно знати величину і характер зміни моментів сил пружності в гнучкому колесі. Максимальний момент сил пружності в гнучкому колесі виникає під час перехідного процесу при різкій зміні моменту сил рушійних і сил опору.

При складанні розрахункової схеми розглянемо найбільш поширений тип хвильового зубчастого приводу, кінематична схема якого наведена на рис. 2. Як видно зі схеми, маса вала електродвигуна пов'язана з гнучким колесом через генератор деформацій. Не зупиняючись на особливостях зв'язку для різних типів генераторів деформацій, будемо вважати, що в першому наближенні цей зв'язок еквівалентний зовнішньому зубчастому зачіплюванню з передавальним числом  $i$ . При жорсткому кріпленні електродвигуна до корпусу виробу і прийнятому спрощенні щодо зв'язку генератора деформацій з гнучким колесом розрахункову схему хвильового зубчастого приводу можна представити як подвійну (рис. 3) [9].

Ця розрахункова схема отримана методом приведення мас, виходячи з рівності кінетичних енергій механізму і моделі. На рис. 3 позначені:  $J_1$  – приведений момент інерції системи з двигуна, муфти та генератора деформацій,  $J_2$  – приведений момент інерції конструкції з мас, з'єднаних з тихохідним валом. При цьому передбачається, що момент інерції деталей,

жорстко з'єднаних з корпусом редуктора, незрівнянно більше моменту інерції мас рухливих частин установки.

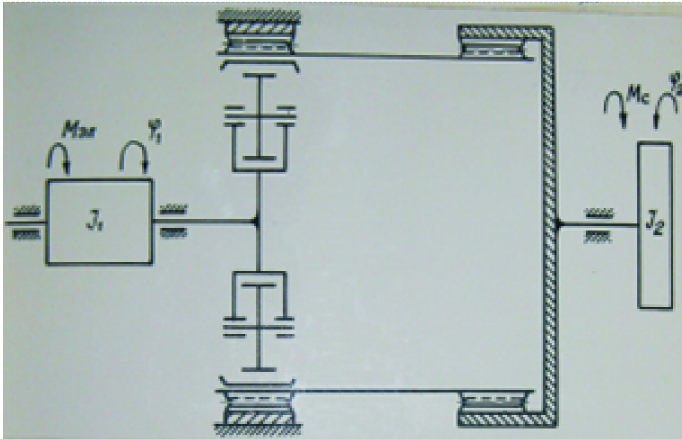


Рис. 2. Кінематична схема хвильового зубчастого приводу

Якщо двигун асинхронний і підібраний з тієї потужності, яку здатний передати редуктор, то приведений до тихохідному валу момент інерції маси його ротора може значно перевершувати момент інерції маси рухомих деталей установки, приведений до тихохідному валу редуктора. Для високообертового електродвигуна з малим моментом інерції ротора і великими розмірами редуктора розрахункова схема може розглядатися як одномасова. Схема буде мати вигляд, зображений на рис. 4.

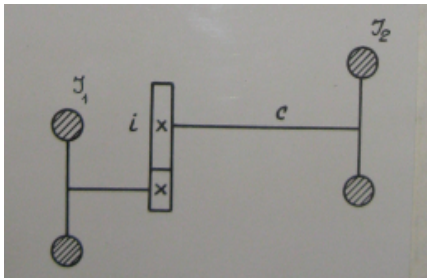


Рис. 3. Розрахункова схема хвильового зубчастого приводу

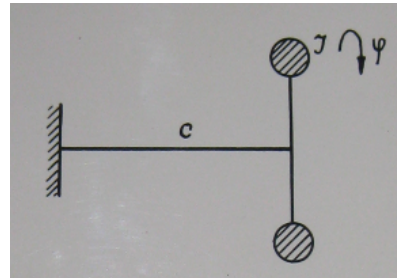


Рис. 4. Одномасова розрахункова схема

Дослідження перехідних процесів у хвильовій передачі дозволяє встановити умови, при яких динамічні навантаження в гнучкому колесі були б близькими до статичних. Динамічні навантаження залежать від відношення часу програми зовнішніх моментів до періоду власних коливань пружної системи  $T$ . Визначення динамічних навантажень у гнучкому колесі дозволяє

забезпечити надійне функціонування приводів космічних літальних апаратів, у яких використовуються хвильові передачі. Для чого введений коефіцієнт  $\lambda = \tau/T$  [10].

При переході з одного режиму роботи машини на інший, тобто при зміні моментів сил рушійних і сил опору, кут закручування гнучкого колеса змінюється. Це може викликати значні перенапруги в матеріалі. Конструктору важливо знати значення максимального кута закручування гнучкого колеса, що визначає рівень напруги в ньому, з метою визначення коефіцієнта запасу міцності. Величина максимального кута закручування залежить від тривалості часу програми і закону зміни зовнішніх моментів, а також низки конструктивних факторів. При дослідженні розглядають випадки зростання навантаження за різними законами від нуля до максимуму.

Таким чином, розглянуто вдосконалення принципів схем хвильових зубчастих передач, починаючи з середини ХХ ст. Окреслено коло науково-технічних і виробничих організацій, де проходили дослідницькі роботи і впровадження в ракетно-космічну техніку цих передач. Показано, що розробкою нових принципів схем хвильових зубчастих передач займалися багато підприємств за кордоном і в СРСР. Зокрема, в КБ «Південне». Хвильові передачі були впроваджені в конструкцію супутників і ракет. На фізико-технічному факультеті Дніпропетровського університету проводилися роботи наукового характеру, захищені три кандидатські дисертації. Дослідження перехідних процесів у хвильовій передачі проводилося лише О. М. Осиповою під керівництвом І. К. Коська. Нею встановлено умови, при яких динамічні навантаження в гнучкому колесі були б близькими до статичних.

**Список літератури:** 1. *Казыханов Х. Р.* Геометрический расчет волновой передачи / Известия вузов // Х. Р. Казыханов, Н. А. Скворцова, Ю. И. Семин. – М. : Машиностроение, 1968. – № 5. – С. 11–30. 2. *Гинзбург Е. Г.* Профилирование зубьев волновой передачи / Е. Г. Гинзбург. – М. : НИИИформтяжмаш, 1967. – С. 18–56. 3. *Ковалев Н. А.* Кинематические исследования эвольвентой волновой передачи, у которой зубья гибкого колеса нарезаны в недеформированном состоянии / Известия вузов // Н. А. Ковалев, И. М. Шапочки – М. : Машиностроение, 1967. – № 1 – С. 20–28. 4. *Шувалов С. А.* Графоаналитический метод анализа геометрии зацепления в волновой зубчатой передаче / С. А. Шувалов // Известия вузов. – М. : Машиностроение, 1965. – № 2. – С. 30–45. 5. *Иванов М. Н.* О кинематике волновых передач / М. Н. Иванов // Известия вузов. – М. : Машиностроение, 1968. – № 8. – С. 14–29. 6. *Цейтлин Н. И.* Методика геометрического расчета волновых зубчатых передач / Н. И. Цейтлин, Э. М. Цукерман // Волновые и цепные передачи – М. : Станкин, 1967. – С. 23–29 7. *Волновые передачи* : сборник трудов / под ред. Цейтлина Н. И. – М., 1970. – 462 с. 8. *Дудников В. С.* Об одном приближенном методе расчета гибких колес герметичных волновых передач / В. С. Дудников // Современные проблемы машиноведения и деталей машин. – Д. : ДНУ, 1973. – С. 33–39 9. *Косько И. К.* Определение коэффициента динамичности волнового зубчатого привода во время переходных режимов нагрузки / И. К. Косько, О. М. Осипова, Ю. И. Виноградов // Вопросы прочности, надежности и разрушения механических систем» – Д., 1969. – С. 180–184 10. *Осипова О. М.* Исследование концепций напряжения у зубьев гибких колес волновой передачи / О. М. Осипова // Известия вузов. – Д. : Машиностроение – 1965. – № 11. – С. 11–20

*Надійшла до редакції 27.09.11*