

УДК 621.3.077.2

## РЕДУКТОР РЕЗОНАНСНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО РУЛЬОВОГО ПРИВОДУ

*П. С. Бондарчук*, провідний інженер

Казенне підприємство спеціального приладобудування «Арсенал»  
e-mail: bondpav@gmail.com

*Викладено загальні вимоги до редуктора резонансного приводу з урахуванням його специфіки. Проведено аналіз основних типів сучасних механічних передач щодо придатності кожної з них для застосування в резонансному рульовому приводі й обрано найбільш підходящу — хвильову передачу з проміжними тілами кочення. Охарактеризовано концепцію приводу в габаритах опорного вузла руля на її основі. Наведено й визначено результати розрахунку масогабаритних показників і оцінку досяжного технічного рівня резонансного рульового електричного приводу на базі обраної передачі.*

**Ключові слова:** резонансний електричний рульовий привід, редуктор, хвильова передача з проміжними тілами кочення.

*The general requirements to a reducer of the resonant drive taking into account its specifics are stated. The analysis of the main types of the modern mechanical transmissions regarding suitability of each of them for application in the resonant steering drive is carried out and the most suitable – wave transmission with the intermediate bodies of rolling is selected. The concept of the drive in overall dimensions of a reference node of a wheel on its basis is discussed. Results of calculation of mass-dimensional indexes and an assessment of an achievable technological level of a resonant steering electric actuator on the basis of the selected transmission are brought and are discussed.*

**Keywords:** resonant electric steering drive, reducer, wave transmission with the intermediate bodies of rolling.

### Вступ

Під час побудови електричних рульових приводів літальних апаратів питання застосування механічних передач завжди становило певну проблему, оскільки до них висувалися значно жорсткіші вимоги, ніж в інших галузях техніки. Приводи літальних апаратів повинні забезпечувати надійну роботу при мінімальних габаритах і масі. Ця вимога викликана високою ціною кожного кілограма маси конструкції літального апарата. Як було зазначено в праці [1], для протитанкових ракет, наприклад, один кілограм маси конструкції викликає збільшення стартової маси ракети на 4 кг. Для ракет із системами самонаведення ціна кілограма конструкції ще вище.

Як видно з праці [2] виконання типового завдання управління гіпотетичної обертової по крену ракети може бути забезпечено застосуванням резонансного електричного рульового приводу (РЕП) з мініатюрним виконавчим двигуном (ВД) масою всього 1 г, діаметром  $D_{ВД} = 6$  мм, довжиною  $L_{ВД} = 9$  мм. Для узгодження цього двигуна з навантаженням потрібен редуктор з великим передавальним відношенням, що має масу і габарити, порівняні з ВД, інакше проведення мініатюризації виявиться неефективною і може втратити сенс. Тому вибір прийнятної ме-

ханічної передачі для мінімізованого рульового приводу є актуальним завданням.

Зазвичай в електричних рульових приводах ракет широко застосовувалися циліндричні і планетарні передачі. Застосування таких передач не забезпечує досягнення гранично можливих питомих характеристик. За масою і габаритами при великих передавальних відношеннях вони виявляються великими настільки, що вигравш від мінімізації виконавчого двигуна стає незначним. Для вирішення цієї проблеми необхідний пошук варіантів підходящих механічних передач та вибір найкращої для резонансного приводу.

Вирішенню цього завдання присвячена дана праця.

У розділі «Вимоги до редуктора» викладені загальні вимоги до редуктора резонансного приводу з урахуванням його специфіки.

У розділі «Сучасні механічні передачі» проведено короткий огляд літератури за темою, наведені основні типи сучасних передач, проведений аналіз придатності кожної з них для застосування в резонансному рульовому приводі і обрана найбільш підходяща — хвильова передача з проміжними тілами кочення (ВППТК). У розділі «ВППТК і концепція «привід в опорі»» наведено опис згаданої передачі і обговорюється концеп-

ція приводу в габаритах опорного вузла руля на її основі.

У розділі «Орієнтовний розрахунок показників приводу» наведено результати розрахунку масогабаритних показників резонансного приводу з ВППТК. Проведено оцінювання досяжного технічного рівня резонансного рульового електричного приводу на базі ВППТК.

### Вимоги до редуктора

Підходячи до питання формування вимог до редуктора резонансного приводу, необхідно, насамперед, звернути увагу на принцип його дії. Як було описано в праці [1], резонансний привід являє собою механічну коливальну систему, в якій роль маятника виконує ротор виконавчого двигуна, а роль сили, що підтримує коливання — зовнішнє шарнірне навантаження (у разі рульового приводу обертаної по крену ракети — це сила повітряного потоку, що впливає на аеродинамічний руль). Підведення енергії від виконавчого двигуна приводу забезпечує початковий поштовх, ініціацію коливань заданої амплітуди і фази, а також компенсацію втрат від тертя в редукторі. Виходячи із цього, для існування вільних коливань у резонансній системі механічна передача повинна забезпечувати потік енергії як в напрямку від ротора ВД до вихідної ланки, так і у зворотний бік з малими втратами.

Із цього випливає перша найважливіша вимога до редуктора резонансного приводу: він повинен забезпечувати двонаправлений потік механічної енергії, тобто працювати і як редуктор, і як мультиплікатор. Цю вимогу можна вважати специфічною для резонансного приводу. Вона означає, що самогальмівні механічні передачі в резонансному приводі принципово неприйнятні і від механічної передачі потрібен високий ККД в обох напрямках.

Друга найважливіша для нас властивість, що дає змогу значно зменшити масу і габарити приводів — можливість отримання великих передавальних чисел у малому об'ємі і малою масою.

Третя принципова вимога випливає з характеру руху вихідної ланки: передача повинна перетворювати обертальний рух в обертальний. Передачі з іншим характером руху розглядати не будемо. Інші вимоги до редуктора резонансного рульового приводу аналогічні вимогам до редукторів звичайних рульових приводів авіаційної техніки.

### Сучасні механічні передачі

Про стан справ сучасної науки і техніки в галузі механічних передач дають уявлення оглядові та критичні статті [3; 4]. Аналіз сучасних передач з описом їх різновидів в історичному роз-

витку проведений у роботах [5; 6]. Як впливає із цих джерел, нині серед різноманіття різних механічних передач, що перетворюють обертальний рух в обертальний, особливо виділяються два типи:

1) хвильові передачі з проміжними тілами кочення (ВППТК);

2) цівкові або циклоїдні передачі.

Властивості та питомі характеристики цих передач значно перевершують інші відомі типи.

У праці [7] у концентрованому вигляді викладено практичні характеристики сучасних редукторів із ВППТК, серед яких можна коротко відзначити такі переваги:

- високе передавальне число в одній ланці до 60;

- високий питомий момент передач, велика перевантажувальна здатність і висока жорсткість кінематичних ланок;

- високий ККД, що становить 0,8–0,9, а в спеціальній конструкції — до 0,97;

- малий момент інерції, висока динамічність;

- малий кутовий зазор;

- мала вібрація;

- висока надійність і тривалий термін служби.

До недоліків цих редукторів відносять необхідність застосування дорогого технологічного обладнання при їх виробництві. Цей недолік значною мірою долається появою на ринку доволі якісного обладнання багатьох виробників за доступними цінами.

Інший недолік цих передач (зазначений у [5; 8]) полягає в тому, що їх ККД різко падає при збільшенні передавального відношення в одній ланці понад 20...30, а при передавальних числах понад 40 передача може перетворитися на самогальмівну.

Як зазначено в [9], у конструкції цих передач тіла кочення (шарики або ролики), одночасно з передачею крутного моменту сприймають і радіальне навантаження, як у радіальних підшипниках, що дозволяють поєднувати функцію редуктора і опорного пристрою. Таке поєднання властивостей редуктора і опорного пристрою у виконавчому механізмі рульового приводу дає змогу скоротити масогабаритні показники і є новим і перспективним напрямком у розробці рульових приводів ЛА. В роботі [11] проведений цікавий аналіз масогабаритних показників рульових приводів безпілотного ЛА з різними типами механічних передач, включаючи ВППТК. Порівняльний аналіз показав перевагу використання цієї передачі в зазначеному типі приводів. При цьому питома маса конструкції виконавчого механізму з ВППТК становила близько  $4 \cdot 10^{-3}$  г/мм<sup>3</sup>, питомий момент конструкції — 83,5 Н · м/кг.

В останні два десятиліття теорія і практика ВППТК досягли рівня впровадження в інженерну практику, в серійне виробництво. Розроблені і впроваджені інженерні методики розрахунку, проектування цих передач. Виробництво різних механізмів на їх основі освоєно цілим рядом підприємств Росії, Білорусії та України. Судячи з кількості сучасних публікацій з тематики ВППТК, роботи над ними ведуться досить активно в усіх зазначених країнах.

Іншим типом сучасних механічних передач, що володіють гарними характеристиками, є планетарні цівкові передачі з циклоїдним зачепленням. Вони отримали свою назву за наявністю цівок — елементів зачеплення і за циклоїдальним характером руху елементів зачеплення. В роботі [5] зазначено, що існуючі у світі зразки редукторів з такими передачами мають дуже хороші характеристики. Серед переваг даних передач відзначають такі:

- малі габарити і високий питомий момент (від 12 до 33 Н · м/кг);
- широкий діапазон передавального відношення однієї ланки (до 500);
- високий коефіцієнт корисної дії (до 92 %);
- високі надійність і довговічність;
- висока стійкість до перевантажень (до 500 %);
- мала інерційність і низький рівень шуму (до 70 дБА).

Як недолік вказуються високі вимоги, що висуваються до точності виготовлення цівочних коліс і збирання, особливо при малих (менше 50 мм) діаметрах передач. Виконання цих вимог можливе тільки на дорогому технологічному обладнанні виробництва Швейцарії та Японії, яке доступне далеко не кожному машинобудівному підприємству.

Крім того, як впливає з розглянутих джерел, досягнутий питомий момент цівочних передач істотно (більш ніж у 2,5 разу) поступається ВППТК. При цьому слід звернути увагу, що для ВППТК вище наведений питомий момент виконавчого механізму, тобто механічної передачі з виконавчим двигуном, а для цівочних передач — тільки, власне, механічної передачі.

У роботі [10] наведені відомості про те, що застосовність цівочних редукторів до 2013 р. досягла 30 % у США і 60 % в Японії і Південній Кореї, що є яскравим свідченням ефективності таких передач. Там же зазначено, що ці передачі мають високий ККД в обох напрямках навіть при великому передавальному відношенні однієї ланки, тому використання цих передач у режимі мультиплікаторів там, де це необхідно, є кращим.

У цьому полягає перевага цівочних передач над ВППТК, які мають більш високий ККД тільки при

порівняно невеликих (до 20–30) передавальних відношень в одній ланці. Тобто для створення редуктора з великим передавальним відношенням і з високим ККД на базі ВППТК доводиться будувати багатоступеневу передачу, тоді як для редуктора з такими ж характеристиками на базі цівочних передач може бути достатньо одного ступеня.

Розгляд властивостей і характеристик планетарних цівочних передач вказує на те, що за технічними характеристиками вони найбільш підходять для застосування в резонансному приводі. Однак реалізація мініатюрного цівочного редуктора для рульового приводу ЛА виявляється досить проблематичною через відсутність технологічного обладнання необхідної точності. Прикладів реалізації мініатюрних цівочних редукторів поки що немає ні в Росії, ні в Білорусії, де вже налагоджений серійний випуск планетарно-цівочних редукторів різного призначення.

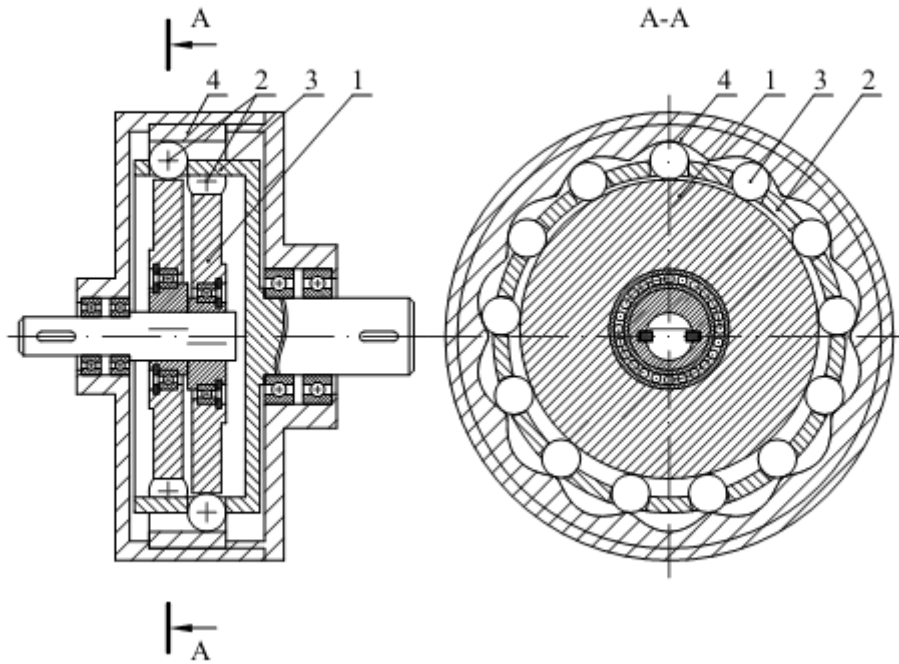
Водночас у літературі [9; 11] розглядаються приклади реалізації силових мініатюрних приводів на основі ВППТК, що свідчить про те, що ці передачі легше піддаються мініатюризації і можуть бути реалізовані практично. Тому для реалізації мініатюрного редуктора для резонансного електричного рульового приводу (РЕРП) є доцільним зупинити вибір на ВППТК.

Таким чином, розглянувши характеристики ВППТК і циклоїдних передач, можна сказати, що кожна з них має свої переваги й недоліки і обидві вони застосовні в мініатюрному редукторі РЕРП. Однак, з міркувань технологічної реалізованості в мініатюрному виконанні, на даному етапі робимо вибір на користь ВППТК. Нижче розглянемо цю передачу більш докладно.

### **ВППТК і концепція «привід в опорі»**

Конструкція і принцип роботи цієї передачі досить прості і можуть проілюструвати рисунком.

Передача складається з чотирьох основних елементів: привідного вала з ексцентриком 1, сепаратора 2, тіл кочення 3 і жорсткого колеса або вінця кулачкових секторів 4. Ексцентриковий вал 1, обертаючись, викликає радіальне переміщення тіл кочення 3 в пазах сепаратора 2. Тіла кочення, контактуючи з робочими поверхнями вінця кулачкових секторів 4, викликають обертання сепаратора. Кожний повний оборот ексцентрикового вала повертає сепаратор на один кулачковий сектор. Таким чином, передавальне відношення визначається кількістю кулачкових секторів вінця. Для підвищення динамічної врівноваженості і здатності навантаження ексцентрик виконаний з двоєним. У конструкціях із затиснутим сепаратором вихідним валом слугує жорстке колесо.



Конструктивна схема хвильової передачі із зовнішнім розташуванням жорсткого колеса:  
 1 — хвилеутворювач; 2 — сепаратор; 3 — тіла кочення; 4 — жорстке колесо

У роботі [9] сформульована концепція силового мініприводу в опорному вузлі руля на базі описаних передач і перелічені такі його особливості:

1. Використання хвильової кулькової передачі дає змогу отримати високий ККД, малі габарити, низьку вартість, високий ресурс і надійність, високу крутильну жорсткість, малий момент інерції і люфт, можливість виконувати функцію опорного пристрою.

2. Коаксіальне розташування основних елементів, тобто розташування елементів на одній осі, так що одні елементи розташовуються всередині інших. Крім ущільнення компоновки використання одних і тих самих деталей, що виконують різні функції, дозволяє отримати жорсткий безлюфтовий зв'язок між елементами.

3. Використання безкорпусних двигунів.

За наведеними в тій самій роботі результатами реалізації цієї концепції в приводах управління безпілотних ЛА переваги описаного підходу доволі істотні.

Разом із тим, необхідно розуміти, що далеко не всякий силовий рульовий електропривід може бути ефективно реалізований у рамках цієї концепції. Потрібна потужність виконавчого двигуна, а отже, його маса й об'єм може виявитися значно більшою, ніж маса й об'єм механічної передачі разом з опорним вузлом. У цьому випадку конструктивно вписати виконавчий двигун з редуктором в опорний вузол виявиться вельми проблематично або зовсім неможливо. Такі при-

води доцільно реалізовувати в рамках якоїсь іншої концепції, яку можна коротко сформулювати як, наприклад, виконавчий двигун плюс редуктор в опорі; або: виконавчий двигун з першим ступенем редуктора плюс другий ступінь в опорі; або якійсь ще. Відзначимо, що ідея поєднання функцій деталей і елементів конструкції приводу може дати свій позитивний ефект у рамках будь-якої обраної концепції.

Такими є рульові приводи стабілізованих по крену літальних апаратів, які вчиняють швидкісні маневрені польоти, тривалість яких перевищує теплову сталу часу виконавчого двигуна рульового приводу. Зазначимо, що теплова стала часу виконавчих двигунів, застосовуваних у рульових приводах ЛА, становить порядку одиниць хвилин. Зрозуміло, що при більш тривалому навантаженні виконавчого двигуна можливості його форсування по середній потужності, тобто можливості зниження його маси й об'єму істотно обмежуються.

Резонансний рульовий електричний привід має кардинальні переваги щодо можливості зниження маси й об'єму виконавчого двигуна і первинного джерела живлення над рульовими приводами стабілізованих по крену ракет. Це, насамперед, пов'язано з тим, що резонансний режим роботи дозволяє використовувати для управління обертового по крену ЛА енергію набігаючого потоку, а не енергію бортового джерела живлення. Як було зазначено в [1], у разі виконання умови резонансу, енергія бортового

джерела живлення витрачається тільки на компенсацію втрат від тертя в редукторі й опорному вузлі приводу. Це є головною причиною різкого зниження потрібної потужності виконавчого двигуна і джерела живлення.

Інший суттєвий фактор зниження потрібної маси й об'єму виконавчого двигуна пов'язаний з короточасним режимом роботи РЕПІ. Час польоту різних безпілотних ЛА, в яких він знаходиться застосування, становить від одиниць до десятків секунд. Це значно менше теплової постійної застосовуваних виконавчих двигунів, що дозволяє багаторазово форсувати їх по потужності й, отже, багаторазово додатково знизити їх масу й об'єм.

Враховуючи все вищесказане, доречно очікувати, що в РЕПІ об'єм виконавчого двигуна виявиться менше об'єму опорного вузла з редуктором, що дасть змогу ефективно реалізувати привід в концепції «привід в опорі». Для перевірки сказаного нижче проведемо орієнтовний розрахунок масогабаритних показників РЕПІ.

#### Орієнтовний розрахунок показників приводу

На підставі досвіду, набутого під час розробки ряду рульових приводів ЛА на базі ВППТК автор роботи [9] запропонував низку емпіричних виразів (1...4) для орієнтовного розрахунку габаритів цих передач. Скористаємося пропонованими виразами для розрахунку зовнішнього діаметра  $D$  і довжини  $L$  передачі:

$$D = \left( \frac{2,06}{\sin(\pi/q)} + 1,8 \right) d_{к(р)}; \quad (1)$$

$$L = (1,2n + 1,8) d_{к(р)}, \quad (2)$$

де  $n$  — число рядів тіл кочення;  $q$  — передавальне число ступеня редуктора;  $d_{к(р)}$  — діаметр кульки(ролика).

Як видно з наведених виразів, як основний параметр, через який визначаються всі геометричні розміри передачі, обраний діаметр тіла кочення  $d_{к(р)}$ . Цей же параметр визначає її здатність навантаження. Мінімальний допустимий діаметр тіла кочення визначається за формулою:

$$d_{к(р)} \geq \sqrt[3]{\frac{241M_n \sin(\pi/z_{к(р)})}{nk_p z_{к(р)}}}, \quad (3)$$

де  $z_{к(р)}$  — число тіл кочення (в одному ряду);  $M_n$  — максимальний момент навантаження;  $k_p$  — коефіцієнт, що характеризує збільшення допустимого моменту при використанні роликів.

При довжині роликів  $l_p = d_p$  прийнято  $k_p = 2$ , для кульок  $k_p = 1$ .

Число тіл кочення (в одному ряду) на одиницю менше передавального числа, що дорівнює числу западин жорсткого колеса:

$$z_{к(р)} = q - 1. \quad (4)$$

Тепер, використовуючи вирази (3) і (4), задавшись передавальним відношенням вихідної ланки редуктора  $q = 25$  і максимальним моментом навантаження  $M_n = 1,2$  Нм, отримуємо  $d_{к} \geq 0,92$  мм. Обравши  $d_{к} = 1$  мм і використовуючи вирази (1) і (2), можемо розрахувати орієнтовно габарити дворядного ( $n = 2$ ) кулькового редуктора:

$$D = 18,2 \text{ мм}, L = 4,2 \text{ мм}.$$

Об'єм механічної передачі становив близько  $1100 \text{ мм}^3$ . Спираючись на досягнуту в [11] питому масу конструкції  $4 \cdot 10^{-3} \text{ г/мм}^3$ , маса нашого редуктора орієнтовно буде 5 г.

Як зазначалося вище, маса і габарити мінімізованого виконавчого двигуна РЕПІ становили  $m_{вд} = 1$  г,  $D_{вд} = 6$  мм,  $L_{вд} = 9$  мм. Об'єм виконавчого двигуна — близько  $254 \text{ мм}^3$ .

Як бачимо, об'єм виконавчого двигуна більш ніж у чотири рази менше обсягів механічної передачі. Таке співвідношення обсягів вказує на те, що виконавчий двигун цілком може бути вписано в конструкцію механічної передачі і, таким чином, привід РЕПІ цілком може бути реалізований у рамках концепції «привід в опорі».

Загальна маса виконавчого механізму становитиме близько 6 г, а питомий момент — приблизно  $200 \text{ Н} \cdot \text{м/кг}$ . Можливо, що такий високий питомий момент пояснюється порівняно малою часткою маси виконавчого двигуна в загальній масі виконавчого механізму і це є характерною ознакою резонансного електричного приводу. Перевірити це припущення можна за результатами розробки конструкції мінімізованого резонансного приводу.

Зазначений рівень орієнтовно можна вважати гранично досяжним, тобто таким, за якого застосовуваними матеріалами ще можливо забезпечити міцність і стійкість конструкції.

На практиці цей рівень питомих показників порівняно легко може бути досягнутий для резонансних рульових приводів у діаметрах більше 50 мм. У нашому випадку (мініатюрний рульовий привід) рівень досяжних питомих показників може виявитися значно обмеженим технологічними можливостями устаткування, можливостями мініатюризації.

Для з'ясування цих можливостей необхідно провести пробну розробку та виготовлення діючого макета мініатюрного резонансного рульового електроприводу.

### Висновки

За результатами виконаної роботи можна зробити такі висновки:

1. Для реалізації мініатюрного РЕРП найбільш підходящим є редуктор на базі хвильової передачі з проміжними тілами кочення.

2. Концепція «привід в опорі» найкращим чином підходить для РЕРП.

3. Оцінка досяжного питомого моменту РЕРП показує його більш ніж дворазову перевагу над досягнутим питомим моментом звичайного рульового електроприводу.

Отримані результати дають можливість визначити напрямки подальших робіт за темою, пов'язаною з практичною реалізацією мініатюрного РЕРП, які будуть присвячені розробці і дослідженню діючого макетного зразка цієї техніки.

### ЛІТЕРАТУРА

1. *Бондарчук П. С.* Резонансный рулевой электрический привод. Современное состояние и анализ показателей качества / П. С. Бондарчук // *Авиационно-космическая техника и технология*. — 2011. — №3 (80). — С. 23–29.
2. *Бондарчук П. С.* Резонансный рулевой электрический привод. Моделирование минимизированного привода / П. С. Бондарчук // *Наукоємні технології*. — 2014. — №4 (24). — С. 467–470.
3. *Парубец В. И.* Всякий кулик своё научное болото хвалит / В. И. Парубец // *Редукторы и приводы*. — 2008. — № 1. — С. 1–4.
4. *Янгулов В. С.* Волновые передачи с промежуточными телами (состояние, результаты и задачи) / В. С. Янгулов // *Томский политехнический университет. Известия Томского политехнического университета*. — 2007. — Т. 311. — № 2. — С. 14–18.
5. *Лустенков М. Е.* Передачи с промежуточными телами качения: определение и минимизация потерь мощности: монография / М. Е. Лустенков. — Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2010. — 274 с.
6. *Янгулов В. С.* Проектирование передач с линейными перемещениями выходного звена: учеб. пособие / В. С. Янгулов; Томский политехнический университет. — Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2011. — 169 с.
7. *Гарбузов А. А.* Волновые редукторы с промежуточными телами качения / А. А. Гарбузов // *Молодежь и наука: Сб. материалов VI-й Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых*. — [Электронный ресурс] / отв. ред. О. А. Краев. — Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2011.
8. *Бубенчиков А. М.* Математическое моделирование работы эксцентриковой передачи с промежуточными телами качения и самоторможением / А. М. Бубенчиков, Н. Р. Щербаков // *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*. — 2009. — № 1 (19), ч. 1 — С. 65–71.
9. *Степанов В. С.* Методика проектирования привода на основе волновой передачи с телами качения : автореф. дис...канд. техн. наук: 05.02.02 / В. С. Степанов. — М. : ГТУ МАИ, 2009. — 20 с.
10. *Мугин О. Г.* О замечательных свойствах эпициклоиды и гипоциклоиды в применении к механическим передачам / О. Г. Мугин, О. О. Мугин, А. В. Синев // *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки; Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук. Вестник научно-технического развития*. — 2013. — № 1 (65) — С. 28–32.
11. *Крылов Н. В.* Анализ массогабаритных показателей электромеханических рулевых приводов с различными типами механических передач / Н. В. Крылов, С. Л. Самсонович, В. С. Степанов // *Известия ТулГУ. Технические науки*. — 2012. — Вып. 1. — С. 26–31.

Стаття надійшла до редакції 27.02.2015