

УДК 621.825.6



А.М. Саньоцький,
здобувач,
Тернопільський
національний технічний
університет
e-mail:
san.andry@gmail.com

КЛАСИФІКАЦІЙНИЙ АНАЛІЗ, ОСНОВИ ТЕОРІЇ І ЕЛЕМЕНТИ РОЗРАХУНКУ СИНХРОННИХ КАРДАННИХ ШАРНІРІВ РІВНИХ КУТОВИХ ШВИДКОСТЕЙ

А.М. Саньоцький. Класифікаційний аналіз, основи теорії і елементи розрахунку синхронних карданних шарнірів рівних кутових швидкостей. Проведено класифікаційний аналіз, описано основи теорії і елементи розрахунку синхронних карданних шарнірів, що використовуються в авто-тракторних трансмісіях транспортних засобів. Наведені основні вимоги щодо розробки і проектування нових конструкцій.

A.M. San'otskiy. Classification analysis, the basic theory and elements of calculation of synchronous cardan hinge equal angular velocities. A classification analysis describes the basic theory and elements of calculation of synchronous universal joint used in automotive transmissions vehicles. The basic requirements for the development and design of new structures.

Вступ. Синхронні карданні шарніри рівних кутових швидкостей є невід'ємною частиною переважної більшості сучасних автотракторних транспортних засобів. Вони широко використовуються для передачі обертового руху і потужності ведучих і одночасно керованих коліс в трансмісіях різноманітних транспортних засобів при залежній, або незалежній конструкції підвіски. Також слугують для з'єднання і компенсації не співвісності ведучого і веденого валів з осями, що перетинаються під постійним, або змінним кутами в просторі.

Великий вклад в дослідження існуючих конструкцій синхронних карданних шарнірів рівних кутових швидкостей, а також їх конструювання, кінематичного і динамічного аналізу і синтезу, узагальнені дані з розрахунку і проектування шарнірних механізмів на нагрів, знос і міцність, конструкції стендів для їх випробувань, методи випробувань внесли такі науковці, як акад. Чудаков Е. А., і Кожевников С. Н., а також Лысов М. И., Малаховский Я. Э, Перфильев П. Д, Антонов А. С., Коротоношко Н. И., Гольд Б. В., Тверсков Б. М., Гришкевич А. И., Осепчугов В. В., Гаспарянц Г. А., Лукин П. П, Решетов Л. Н., Бочаров Н.Ф., Цитович И. С. та ін. Також іноземні науковці Fischer I. S., Remington P. M., Valentini P. P., Pezzuti E., Freudenstein F., Haug

Технології, матеріали, транспорт і логістика

Е. J., Schmelz F., Myard F. E., Pennestri E., Stefanelli R., Seherr-Thoss H., Aucktor E., Wagner E. R. та інші [1–12].

Матеріал і результати дослідження. Синхронні карданні шарніри поділяють, перш за все, на конструктивні ряди за величиною передаваного крутного моменту, що визначає навантаження на елементи кінематичних пар. Можливість використання того або іншого типу карданного шарніра залежить від величини кутової швидкості з'єднаних шарніром валів, так як не завжди представляється можливим зрівноважити відцентрові сили інерції, що обумовлюють динамічні процеси в шарнірному механізмі.

Карданні шарніри являють собою пристрої, які здатні передавати крутий момент або обертовий рух від одного вала до іншого при фіксованих або змінних кутах перетину їх осей. З точки зору структури, карданний шарнір необхідно розглядати як кінематичне з'єднання, еквівалентне дворухомому сферичному шарніру.

За кінематичними властивостями карданний шарнір може бути синхронним або асинхронним. Синхронність карданного шарніра забезпечується або відповідним встановленням двох асинхронних карданних шарнірів, або використанням спеціальних типів карданних шарнірів, так званих синхронних з рівними кутовими швидкостями.

За механічними властивостями карданні шарніри поділяються на жорсткі і пружні. Тип карданного шарніра визначає основні параметри шарнірної передачі, її кінематику, максимально допустимі кути нахилу валів, впливає на частоти крутильних коливань (пружні шарніри), а при встановленні універсальних карданних шарнірів забезпечує і компенсацію осьових переміщень.

Розрізняють також карданні шарніри прості і універсальні. За наявності в механізмі простого кардана можливе лише кутове переміщення двох валів, а за наявності універсального – можливе як кутове, так і осьове переміщення привідних валів, причому осьове переміщення реалізується всередині самого шарніра. Універсальні карданні шарніри в даний час використовуються рідко. Їх конструктивні ознаки не відображені в класифікації.

Існує велика кількість типів карданних шарнірів. В основу їх класифікації закладені найбільш важливі технічні характеристики. За основну класифікаційну ознаку карданних шарнірів прийнята їх кінематика та характеристика руху, яка може бути із рівномірною (синхронною) або нерівномірною (змінною) кутовою швидкістю. Відповідно карданні шарніри поділяються на дві основні групи: асинхронні (зі змінною) і синхронні (із постійною) кутовою швидкістю (частотою обертання). Карданний шарнір, призначений для роботи зі змінною частотою обертання (асинхронний), передає обертовий рух із змінними відношеннями миттєвих значень частоти обертання між вхідними (ведучими) і вихідними (веденими) елементами при робочому значенні кута карданного шарніра, відмінного від нуля, із забезпеченням середнього передавального відношення рівним одиниці. Синхронний карданний шарнір постійної частоти обертання має передавальне відношення, рівне одиниці.

Існує ще й третя категорія карданних шарнірів, які працюють на частотах обертання, близьких до постійного. Їх передавальне відношення дорівнює одиниці при нульовому, або номінальному для даного механізму кутовому значенні. При інших кутових значеннях передавальне відношення близьке до одиниці. Оскільки відхилення передавального відношення від одиниці відносно невелике в порівнянні з відхиленнями у шарнірних механізмах змінної частоти обертання, механізми, що працюють на частотах, близьких до постійного, зазвичай відносять до тієї ж категорії, що й механізми постійної частоти обертання.

Класифікація карданних шарнірів представлена на рис. 1.



Рис. 1. Класифікація карданних шарнірів

Синхронні карданні шарніри можуть бути виконані з елементів жорстких шарнірів з хрестовиною або представляти собою оригінальну конструкцію. Карданні шарніри першої групи віднесені до так званих подвійних, а другої групи – до спеціальних. Подвійний карданний шарнір представляє собою сукупність двох одинарних шарнірів, у яких проміжний вал може бути замінений сполучною ланкою. Деякі конструкції синхронних карданних шарнірів виконуються з компенсуючим пристроєм всередині механізму, тобто являються універсальними.

За класифікаційну ознаку спеціальних типів синхронних карданних шарнірів прийнятий тип ланки, що передає зусилля карданам. Якщо такою ланкою є сухар, то відповідна група карданних шарнірів відноситься до сухарних, якщо кульки – до кулькових.

Класифікація синхронних карданних шарнірів рівних кутових швидкостей представлена на рис. 2.

Карданні шарніри класифікують також за конструкцією їх опор. Самопідтримуючий шарнір утримується за допомогою внутрішніх засобів і для нього, таким чином, потрібно встановлюючий вузол лише на одному з валів, тобто на веденому або ведучому. Карданному шарніру, який не являється самопідтримуючим, необхідні зовнішні підтримуючі засоби на обох (веденому і ведучому) валах, щоб забезпечити відповідне встановлення всього шарнірного механізму.

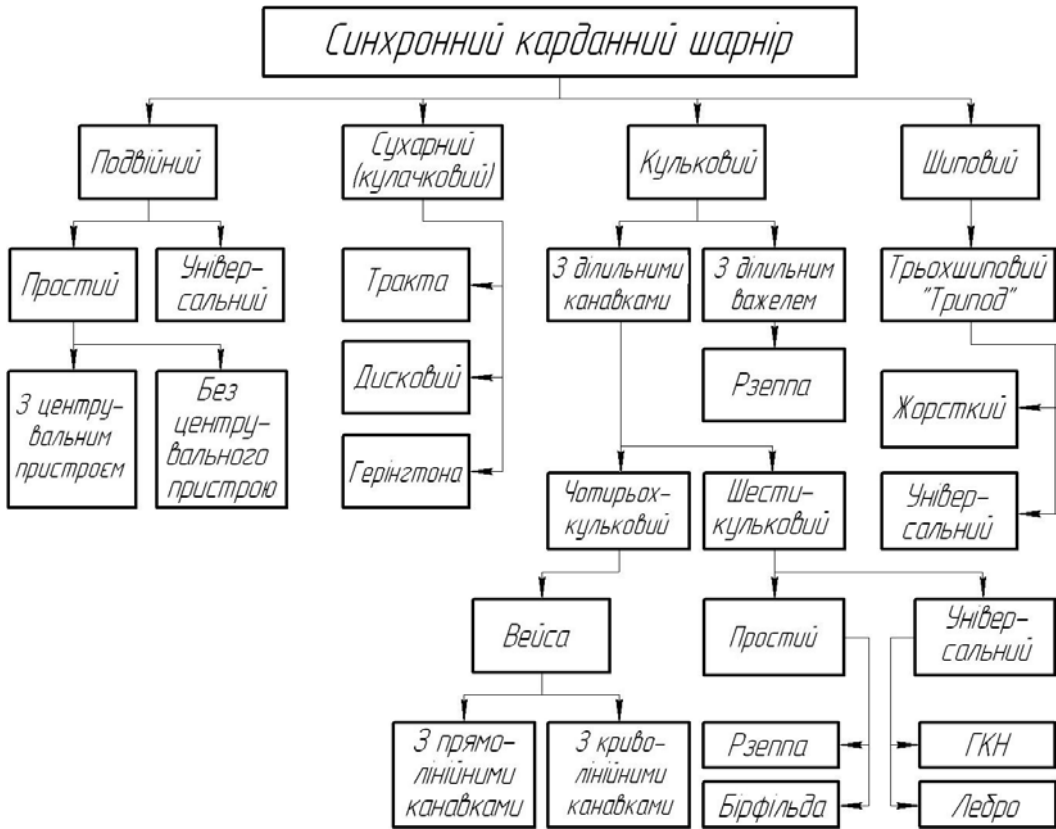


Рис. 2. Класифікація синхронних карданних шарнірів рівних кутових швидкостей

Карданні шарніри розрізняють з фіксованими і рухомими центрами. Перші здатні сприймати осьові зусилля, а другі допускають відносні осьові переміщення вхідних і вихідних ланок.

Ще однією характеристикою карданних механізмів є можливість зміни їх робочого кутового значення між валами. За цією ознакою вони поділяються на механізми з великими і малими робочими кутами. До перших, як правило, відносяться механізми з фіксованими центрами, а до других – механізми з рухомими центрами.

Карданні шарніри можна також класифікувати в залежності від напрямку їх руху. Більшість карданів є реверсивними (двосторонньої дії) і, отже, передають обертовий момент від однієї ланки до іншої з однаковими ККД, потужністю та іншими робочими характеристиками.

Синхронні карданні шарніри при обертанні з деяким кутовим значенням між вхідною і вихідною ланками передають обертовий рух з рівною кутовою швидкістю (постійною частотою обертання) при наступних умовах:

- площина контакту між ведучим і веденим ланками повинна займати постійне просторове положення (у карданного шарніра із змінною час-

- тотою обертання, наприклад одинарного, зазначена площина контакту робить у просторі коливання вперед–назад, стаючи попеременно перпендикулярно кожної із двох вилок);
- площина контакту повинна бути нормальною до площин, що описується осями обертання ведучої і веденої ланок карданного шарніра;
 - площина контакту повинна утворювати деякий кут відносно ведучої і веденої ланок, який еквівалентний половині результуючого кута карданного шарніра.

Площина постійної частоти обертання описується всіма точками контакту карданного шарніра і в неї відношення частот обертання вхідних і вихідних ланок дорівнює одиниці. Дана площина ділить навпіл тупий кут, утворений осями обертання вхідної і вихідної ланок, залишаючись нормальною до площини, якій належать дані осі.

Вимога до стабільності частоти обертання означає, що всі точки контакту вхідної і вихідної ланок у будь-який момент часу повинні лежати в площині, що поділяє навпіл будь-який кут в межах всього діапазону зміни кута карданного шарніра. В деяких конструкціях шарнірних механізмів постійна частота обертання забезпечується лише при конкретних кутових значеннях між вхідною і вихідною ланками або при таких значеннях, що лежать за межами діапазону зміни кута карданного шарніра; при інших кутових значеннях вони передають обертання лише з близькою до постійної частоти. Для задоволення вимоги до постійності частоти обертання ні одна точка, що належить площині частоти обертання, не може бути пов'язана ні з одним із елементів веденого або ведучого карданного шарніра.

Схема та основний принцип роботи карданного шарніра рівних кутових швидкостей у вигляді простої моделі представлена на рис. 3.

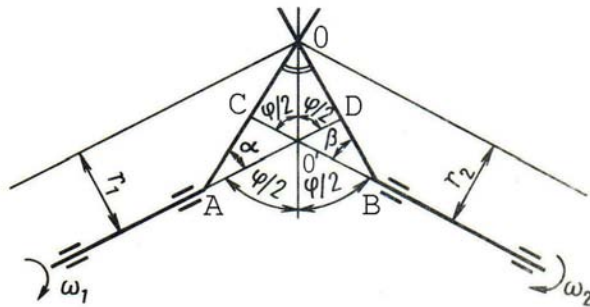


Рис. 3. Кінематична схема роботи карданного шарніра рівних кутових швидкостей

В синхронному карданному шарнірі рівних кутових швидкостей (рис. 3) відсутній фіксований шарнірний зв'язок між карданими вилками. Вали мають плечі, кожне з яких розташоване під одним і тим же кутом α і β . Коли осеві лінії вхідного і вихідного валів утворюють кут шарніра γ , точка їх кон-

такту O лежить у площині креслення і в площині постійної частоти обертання, або в площині, що поділяє навпіл тупі кути. Точка контакту O може переміщатися по карданних вилках. Якщо у них передбачити ділильні канавки або інше конструктивне рішення, що забезпечує рух точки O в бісекторній площині, коли при будь-якому положенні вилки $a=b$, то можна одержати рівність кутових швидкостей вхідного і вихідного валів. В карданних шарнірах з ділильним важелем для більш точного встановлення проміжної ланки в бісекторній площині застосовують спеціальний ділильний механізм, що забезпечує її встановлення.

Кругова швидкість точки контакту O становить:

$$V_o = {}_1r_1; V_o = {}_2r_2. \quad (1)$$

Звідки ${}_1r_1 = {}_2r_2$.

Підставивши в цю рівність значення

$$r_1 = AO \sin \alpha \quad \text{і} \quad r_2 = BO \sin \beta,$$

отримаємо:

$${}_1AO \sin \alpha = {}_2BO \sin \beta. \quad (2)$$

Кутові швидкості ведучого і веденого валів рівні, якщо $AO=BO$; $\alpha=\beta$.

Внаслідок симетрії точка контакту O буде розташована в бісекторній площині, що поділяє кут навпіл між осями обертання, і при всіх інших положеннях, що очевидно, зокрема, із рівності трикутників $OO'C$ і $OO'D$. Радіус точки контакту в обох ланках однаковий, і, відповідно, частоти обертання двох валів постійно являються рівними.

Різноманітні конструкції синхронних карданних шарнірів є найбільш поширеними засобами забезпечення сталості частоти обертання шляхом використання принципу площини контакту, точки якої мають однакову кутову швидкість. Дана площина проходить через миттєвий центр шарніра і в будь-який момент ділить навпіл кут між осями обертання веденого і ведучого валів. Під миттєвим центром тіла вважаємо вісь, що проходить через деяку точку, рух тіла навколо якої в будь-який момент часу являється лише обертовим, і, відповідно, в його істинному русі відсутня переносна складова. Осі обертання, що перетинаються, визначають положення геометричного центру шарніра. Таким чином, миттєвий центр обертання синхронного карданного шарніра збігається з його географічним центром тоді, коли площина контакту лежить у площині, що розділяє кут φ навпіл.

Для передачі рівної кутової швидкості в синхронному карданному шарнірі необхідно наявність проміжної ланки в площині постійної частоти обертання, яка повинні викликати відносно кутове зміщення карданних вилки і при відповідному напрямку руху утворювати контакт у площині, що поділяє кут навпіл. Якщо карданний шарнір передає обертання з постійною частотою, то частота обертання всіх основних ланок також буде постійною. Таким чином, основна проблема проектування синхронного карданного шарніра

постійної частоти обертання зводиться до розробки пристрою, яке забезпечувало б контакт між веденими і ведучими ланками в бісекторній площині, що поділяє тупий кут φ навпіл.

Коли синхронний карданний шарнір повертається на деякий кут, то для збереження сталості частоти обертання проміжна ланка повинна самостійно переміститися в площину, що ділить кут навпіл. Теоретично ідеальне обертання можливе лише навколо того ж центру, який слугує для утворення кута шарніра. Отже, в залежності від геометричних характеристик канавок ковзання в конкретній конструкції шарніра відстань від центру або до центру радіальної площини, відстань по перпендикуляра до неї, а також результуюча траєкторія, по якій повинна рухатися проміжна ланка, являється функцією відносного ковзання.

Відносний обертаний рух кулачків відбувається з використанням значних сил тертя і в результаті утворюється інтенсивний контакт між кулею і канавкою проміжної ланки. Співвідношення обертання і осьового переміщення в карданному шарнірі є важливим параметром, що визначає допустимі швидкості і навантаження. Великі осьові переміщення обмежують екстремальні значення робочих параметрів. При цьому не тільки зменшується допустиме навантаження, але і різко обмежуються робочі швидкості внаслідок підвищення температури за рахунок тертя.

У конструкціях карданних шарнірів постійної частоти обертання замість куль можна використовувати й інші деталі: ролики, півсфери, конуси і т. д. Ці деталі нерідко здатні забезпечувати кращий контакт по канавці спряжених ведучої і веденої ланок і, відповідно, більш широкий діапазон допустимих навантажень. Проте при їх використанні виникає проблема забезпечення певного положення осі обертання деталей кочення в площині постійної частоти обертання. Вони мають більш високу складову ковзання в порівнянні з кулями.

Постійну частоту обертання можуть забезпечувати і карданні шарніри, в конструкції яких не передбачені елементи кочення однієї або обох ланок ведучого вала. Найбільш характерним прикладом такої конструкції є вал з подвійним карданним шарніром, в якому два звичайних карданних шарніра з'єднані за допомогою вилки та відповідний пристрій забезпечує опору і поділ результуючого кута між ведучою і веденою ланками. Вісь обертання сполучної вилки лежить у площині кута шарніра. Коли загальний кут шарніра ділиться навпіл, вилка розташовується симетрично площині, що поділяє кут навпіл, а її вісь обертання перпендикулярна цій площині. Вилка і забезпечує той контакт, який є необхідною умовою сталості частоти обертання. Проте, необхідно відзначити, що вилка разом із приєднаними до неї деталями не обертається за тим же законом, що і шарнір. Подвійний карданний шарнір розрахований на те, щоб забезпечувати сталість частоти обертання тільки при одному певному кутовому значенні, що знаходиться за межами деякого об-

меженого діапазону зміни кута шарніра або виходить взагалі за межі повного діапазону можливих змін цього кута.

Різновидом карданного шарніра постійної частоти обертання є шарнір Тракта, який складається з двох вилок, з'єднаних двома проміжними ланками. При відповідній опорі і центруванні за допомогою зовнішніх засобів проміжні ланки ділять загальний кут шарніра порівну. Крім того, ці дві проміжних ланки завжди симетрично розташовані відносно площини, що ділить кут шарніра на дві частини, і лежать у площині його кута. При цьому передається обертання з постійною частотою. Функція, що полягає в поділі навпіл кута шарніра, в цьому випадку повністю аналогічна функції, що виконує сполучна вилка вала з подвійним карданним шарніром.

Згідно з викладеними раніше вимогами, виконання яких необхідне для забезпечення сталості частоти обертання, конструкція карданного шарніра повинна бути такою, щоб завжди був контакт між ведучою і веденою ланками в площині, що поділяє навпіл кут шарніра.

Функції, що виконуються синхронним карданним шарніром істотно змінюються в залежності від області його застосування. Можна виділити чотири основні параметри, що характеризують будь-який шарнірний механізм:

1. Обертювий момент. Першою і основною задачею синхронного карданного шарніра являється забезпечення передачі обертювювого моменту від джерела енергії до привідного механізму, що обертається, в умовах, коли існує певний кут між їх осями.
2. Частота обертання. Синхронний карданний шарнір дозволяє працювати при найбільш оптимальній частоті обертання.
3. Кутюве положення. Синхронні карданні шарніри, що використовуються в привідних механізмах, повинні забезпечувати нормальне функціонування як при постійних, так і при змінних кутах між осями валів, що обертаються.
4. Осьюва компенсація. В деяких конструкціях синхронних карданних шарнірах передбачена осьюва компенсація, або зміна довжини валів. У типовому двошарнірному кардані компенсаційні зміни довжини (осьюві переміщення) можуть відбуватися: 1) між центрами універсальних шарнірів; 2) з одного або з обох кінців із зовнішньої сторони від їх центрів; 3) всередині одного або обох універсальних шарнірів, які допускають можливість переміщення їх валів.

Оскільки синхронний карданний шарнір є необхідним елементом системи передачі обертання, його робота багато в чому визначається ведучими і веденими ланками, що входять в його конструкцію, а також ланками, що забезпечують його підвіску і опору. Динамічні характеристики останніх суттєво впливають на плавність роботи шарнірного механізму при будь-якій специфіці його використання. Функції карданного шарніра визначають діапазон зміни його характеристик, що в кінцевому рахунку виявляє вирішальний вплив на роботу трансмісії. При цьому важливо правильно визначити ці функції, що

впливають з мети використання системи, з тим, щоб оптимально сконструювати синхронний карданний шарнір.

Необхідно зазначити, що разом з чотирма основними параметрами синхронних карданних шарнірів – обертовий момент, частота обертання, кутове положення і осьова компенсація великий вплив на їх працездатність також виявляють параметри підтримуючих елементів.

При конструюванні синхронного карданного шарніра необхідно провести ретельний аналіз його основних параметрів з урахуванням специфічних експлуатаційних характеристик, що впливають з конкретної галузі використання шарнірного механізму. У процесі визначення основних і експлуатаційних параметрів приводу необхідно розглянути обмеження, що накладаються на обертовий момент, а також на ресурс або надійність системи загалом. Зазначені обмеження визначаються або шляхом аналізу досвіду експлуатації, або методом розрахунку на ЕОМ з використанням відповідної математичної моделі. Найкращі результати можна отримати співставленням розрахункових параметрів зі значеннями, отриманими під час лабораторних або натурних випробувань. Значення експлуатаційних параметрів та їх обмеження являються необхідною інформацією при проектуванні і конструюванні, знаючи які, можна спроектувати задовільний синхронний карданний шарнір практично для будь-яких умов експлуатації.

Висновки. В опублікованих у вітчизняних і за кордоном дослідженнях щодо структури, кінематики і динаміки механізмів з карданними шарнірами не всі аспекти проблеми надійності освітлені настільки, щоб вважати задачу про вибір раціональних параметрів приводів з карданними передачами вирішеною. Нерівномірність передавального відношення шарнірних механізмів істотно впливає на процес збудження крутих коливань в елементах приводу трансмісії. При певних параметрах карданного шарніра і його приводу динамічні навантаження можуть швидко зростати. Це призводить до зменшення довговічності, а часто і до виходу з ладу деталей шарнірного механізму. Втрати енергії внаслідок сил тертя обумовлюють дещо менший ККД класичних сухарних (кулачкових) синхронних карданних шарнірів в порівнянні з кульковими аналогами, однак довговічність і термін служби останніх, зокрема шарнірного механізму «Вейс» незначний, що є незадовільним та обмежує його використання при диференціальному (постійному) приводі трансмісії транспортного засобу.

Для розробки ефективних конструкцій синхронних карданних шарнірів надзвичайно важливим є визначення гранично допустимих умов роботи (граничних значень кута нахилу валів півосей, їх частоти обертання, величини передаваного крутного моменту карданним шарніром, його коефіцієнт корисної дії при різному кутовому положенні валів). Такі дані можна отримати лише при лабораторних випробуваннях.

Тому, актуальним є завдання вдосконалення і розробки нових конструкцій синхронних сухарних карданних шарнірів рівних кутових швидкостей, зокрема сфероглобoidного типу та обґрунтування їх раціональних кінематичних, конструктивних, параметричних і динамічних параметрів, що забезпечать підвищення ККД, надійності і довговічності ресурсних показників сухарних синхронних карданних шарнірів.

Література

1. *Кожевников С. Н.* Карданные передачи / С. Н. Кожевников, П. Д. Перфильев. – Киев: «Техніка», 1978. – 264 с.
2. *Малаховский Я. Е.* Карданные передачи / Я. Е. Малаховский, А. А. Лапин, Н. К. Веденев. – М.: Машгиз, 1962. – 155 с.
3. *Шарипов В. М.* Конструирование и расчет тракторов: Учебник для студентов вузов. 2-е изд. перераб. и доп. / В. М. Шарипов. – М. Машиностроение, 2009. – 752 с.
4. *Проектирование полноприводных колесных машин: В 2 т. Учеб. для вузов / Б. А. Афанасьев, Н. Ф. Бочаров, Л. Ф. Жеглов и др.; Под общ. ред. А. А. Полунгяна.* – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. – 488 с.
5. *Гаспарянц Г. А.* Конструкция, основы теории и расчета автомобиля / Г. А. Гаспарянц. – М.: Машиностроение, 1978. – 351 с.
6. *Гольд Б. В.* Карданы равных угловых скоростей: Обзор / Б. В. Гольд, Б. М. Тверсков. – М.: НИИНавтопром, 1967. – 40 с. – (Серия Автомобилестроение).
7. *Гришкевич А. И.* Автомобили: Конструкция, конструирование и расчет. Трансмиссия / А. И. Гришкевич, В. А. Вавуло, А. В. Карпов и др. – Мн.: Выш. шк., 1985. – 240 с.
8. *Проектирование универсальных шарниров и ведущих валов / [Беркер А. Х., Вагнер И. Р., Вебстер Н. В., и др.]; пер. с англ. Ю. В. Попова.* – Л.: Машиностроение, 1984. – 463 с.
9. *Chen C. K.* The kinematic and static analysis of constant velocity coupling / C. K. Chen // Master thesis, Department of mechanical and mechatronic engineering. – National Taiwan ocean university. – 2004.
10. *Schmelz F.* Universal joints and driveshafts / F. Schmelz, H.-Ch. Count Scherr-Thoss, E. Aucktor // Springer-Verlag. – Berlin, 1992.
11. *Universal joint and driveshafts: analysis, design, applications / F. Schmels, H. Chr. Sehher-Thoss, E. Auckor.* – Redditch, 2005. – 351 S.
12. *Wagner E. R.* Universal joint and driveshaft design manual / E. R. Wagner // The Society of Automotive Engineers, 1991.

Надійшла до редакції 17.04.2014