

$$K_{\beta} = \text{abs} \left[ \cos^2 \alpha' / R_{\alpha 2} + \sin^2 \alpha' / R_{\beta 2} - \cos^2 (\alpha' - \theta) / R_{\alpha 1} - \sin^2 (\alpha' - \theta) / R_{\beta 1} \right],$$

где  $\alpha' = \pi / 2 + \alpha$ .

Искомые приведенные главные радиусы кривизны контактирующих поверхностей:

$$(R_{np})_{\alpha} = 1 / K_{\alpha}, \quad (17) \quad (R_{np})_{\beta} = 1 / K_{\beta}. \quad (18)$$

**Вывод.** Таким образом, изложенный алгоритм является основой для разработки вычислительной программы "Krivizna", с помощью которой и предполагается определять радиусы (17) и (18), необходимые для нахождения прочностных характеристик арочных (круговых) зубьев цилиндрических зубчатых передач Новикова в общем случае и для любой фазы зацепления.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, грант 13-08-00386.

**Список литературы:** 1. Решетов Д.Н., Головачев М.И. К расчету арочных передач на сопротивление контактной усталости // Вестник машиностроения. – 1983. – №2. – С.12-16. 2. Догода М.И., Еремин В.Е., Догода А.И. Разработка и освоение высоконагруженных арочных передач и средств для их производства // Вестник машиностроения. – 1990. – №9. – С.41-44. 3. Сирицын А.И., Беляев А.И., Сирицын Д.А. Особенности изготовления и применения высокоточных арочных тяговых зубчатых передач // Вестник машиностроения. – 1997. – №1. – С.3-6. 4. Айратов Э.Л., Городничий В.П., Ерихов М.Л., Сызранцев В.Н. Нагруженность цилиндрических передач с арочными зубьями // Вестник машиностроения. – 1986. – №2. – С.20-22. 5. Севрюк В.Н. Теория круговинтовых поверхностей в проектировании передач Новикова. – Харьков: Изд-во ХГУ, 1972. – 168с. 6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (пер. с англ.). – М.: "Наука", 1970. – 720с. 7. Лопато Г.А., Кабатов Н.Ф., Сегаль М.Г. Конические и гипоидные передачи с круговыми зубьями. Справочное пособие. – М.: Машиностроение, 1977. – 423с. 8. Короткин В.И., Харитонов Ю.Д. Некоторые вопросы геометрии цилиндрических зубчатых передач Новикова с арочными зубьями / Вестник Национального технического университета "ХПИ". Сб. трудов. Тематический выпуск "Проблемы механического привода". – Харьков: Изд. НТУ ХПИ, 2011. – №28. – С.82-91. 9. Раевичский П.К. Дифференциальная геометрия. – М.: Физматгиз, – 1956. – 380с. 10. Новиков М.Л. Зубчатые передачи с новым зацеплением. – М.: ВВИА им. Н.Е.Жуковского, 1958. – 186с.

Поступила в редколлегию 31.03.2013

УДК 621.833

**Кривизны боковых поверхностей взаимодействующих арочных зубьев цилиндрических зубчатых передач Новикова / В.И. Короткин, Ю.Д. Харитонов // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми механічного приводу. – Х.: НТУ "ХПІ". – 2013. – №40(1013). – С.58-63. – Бібліогр.: 10 назв.**

Розглянуто методіку визначення кривизн в точках контакту бічних поверхонь арочних зубів зубчатих передач Новікова для будь-якої фази зацеплення. Розроблено алгоритм комп'ютерної реалізації даної методіки.

**Ключові слова:** арочний зуб, квадратичні форми, кривизни.

The method of determination of the curvatures at the contact points of the teeth flanks arched Novikov gears for any phase of the engagement considered. The algorithm of the computer implementation of this technique developed.

**Keywords:** arch tooth, quadratic forms, curvature.

УДК 621.833; 621.793

**М.А. ЛЕВАНЦЕВИЧ**, к.т.н., доц., ведущий научный сотрудник  
ОИМ НАН Беларуси, Минск;  
**Н.Н. МАКСИМЧЕНКО**, к.т.н., старший научный сотрудник  
ОИМ НАН Беларуси

**РАБОТОСПОСОБНОСТЬ КОНИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ  
С ПЛАКИРОВАННЫМ ВЕНЦОМ ЗУБЬЕВ**

Исследовано влияние композиционных покрытий, сформированных на рабочем профиле зубьев методом плакирования гибким инструментом, на уровень шума конических зубчатых передач. Показано, что при рациональном выборе состава материала покрытия, вида и концентрации легирующих добавок, а также технологических параметров процесса плакирования сформированный слой способствует снижению уровня шума в передаче в среднем на 3-7дБ, а также повышает устойчивость к задиру и заеданию зубьев.

**Ключевые слова:** плакирование, гибкий инструмент, покрытие, коническая зубчатая пара, материал-донор.

**Актуальность задачи.** Вибрации и шум, возникающие в процессе эксплуатации различных механических систем, отрицательно влияют на их эксплуатационные характеристики, повышают интенсивность изнашивания подвижных сопряжений, ухудшают качество выпускаемой продукции и оказывают неблагоприятное воздействие на организм человека. При этом зачастую параметры виброактивности изделия во многом определяют его конкурентоспособность. Учитывая, что одним из узлов, широко используемых в мобильной технике, металлорежущих станках и технологическом оборудовании, оказывающих значительное влияние на их шумовые характеристики, являются зубчатые приводные механизмы, проблема снижения шума и вибраций, генерируемых зубчатыми передачами, является весьма актуальной.

Решение данной проблемы возможно по многим направлениям. Одно из них – формирование покрытий на рабочем профиле зубьев сопрягаемых зубчатых колес [1-3]. Для получения подобных покрытий в основном используются методы высокоскоростного напыления композиционных порошковых материалов и электролитического формирования покрытий (меднение, никелирование, фосфатирование и т.п.). При их реализации необходимо использование энергоемкого оборудования, обслуживаемого высококвалифицированными специалистами, что не всегда возможно. Кроме того, несмотря на положительный эффект по снижению шума и демпфированию колебаний, возникающих в процессе работы зубчатых механизмов, гальванические покрытия быстро истираются или начинают отслаиваться, а сам процесс нанесения гальванических покрытий экологически небезопасен. Перспективным методом для формирования покрытий на рабочем профиле зубьев является метод плакирования гибким инструментом (ПГИ) [4, 5]. В процессе нанесения покрытия гибкий инструмент (металлическая щетка), вращаясь, контактирует как с обрабатываемой поверхностью, так и с бруском из материала покрытия (донором). В результате ударно-фрикционного воздействия ворсинок щетки сформированное покрытие обладает высокой прочностью сцепления с основой. По сравнению с другими методами нанесения покрытий метод ПГИ обладает низкой энерго- и трудоемкостью, прост в использовании, экологически безопасен, а для его реализации не требуется больших производственных площадей.

Полагают, что эффект применения покрытий состоит в разделении контактирующих поверхностей материалом, обладающим высокими антифрикционными и демпфирующими свойствами, что способствует повышению контактной прочности рабочей поверхности зубьев, снижению коэффициента трения, температуры в зоне контакта и вероятности возникновения заеданий [1, 2]. Кроме того, в процессе работы зацепления покрытия могут снизить шум, обусловленный пересопряжением зубьев. Например, медная пленка толщиной до 2мкм способствует снижению уровня шума эвольвентных зубчатых передач в среднем на 15% [3]. Однако, несмотря на полученный положительный опыт применения покрытий на

© М.О. Леванцевич, Н.М. Максимченко, 2013

зубьях шестерен, до настоящего времени известно сравнительно немного данных об опыте их практического использования. Остаются открытыми вопросы, касающиеся выбора рационального состава материала покрытия, толщины и количества наносимых слоев, технологий их формирования и др., что обуславливает необходимость проведения дополнительных исследований.

**Цель работы** заключалась в сравнительной оценке уровня шума, возникающего при работе конических зубчатых передач с круговым зубом без покрытия и с композиционным поверхностно модифицированным слоем, сформированным на рабочем профиле зубьев, а также в изучении влияния состава материала покрытий на уровень шума конических зубчатых передач.

**Материалы исследований.** В качестве объекта испытаний была взята коническая пара привода шпинделя токарного полуавтомата мод.1А734Ф3, выпускаемого ОАО "Минский завод автоматических линий им. П.М. Машерова" (см. рисунок 1). Материал конической пары – сталь 25ХГТ, термообработка – нитроцементация на глубину 0,8-1,2мм, твердость 57HRC, ТВЧ зубчатого венца. Параметры испытываемых зубчатых пар приведены в таблице.



Рисунок 1 – Экспериментальные образцы конических зубчатых колес:  
а – без покрытия; б, в – с композиционным слоем

Таблица – Параметры испытываемых зубчатых пар

Параметр	Зубчатая пара № 1	Зубчатая пара № 2
Средний нормальный модуль $m$	6	4
Число зубьев	$Z_1=25; Z_2=35$	$Z_1=25; Z_2=35$
Тип зуба	круговой	круговой
Частота вращения $n$ , мин <sup>-1</sup>	990	1200
Крутящий момент $M$ , Н·м	1400	1100
Материал	Сталь 25ХГТ	Сталь 25ХГТ

В качестве материалов-доноров для формирования однослойных покрытий методом ПГИ использовали спеченную бронзу Бр05С20Гр0,5ДМ0,5, легированную графитом и дисульфидом молибдена, и литую оловянную бронзу Бр010С10. Для двухслойного покрытия использовали литую медь М1, с последующим нанесением слоя из баббита Б83. Каждый вид покрытия апробировался на отдельных парах шестерен. Покрытие из бронзы Бр010С10 нанесли как на оба колеса зубчатой пары, так и только на одно из колес. Толщина сформированных слоев покрытий не превышала 5-10мкм.

На рисунке 2 показана испытываемая коническая пара и процесс нанесения покрытия на зубья одного из колес.

Замеры уровня шума зубчатых передач без покрытия и с покрытием производились методом сравнительных испытаний на шумообкатном станке

модели 5Б725 Саратовского завода зубострогальных станков.

Сущность сравнительной оценки уровня шума заключается в том, что испытываемую исходную зубчатую пару устанавливают на шумообкатной ста-



Рисунок 2 – Размещение испытываемой конической пары на шумообкатном станке – а; процесс нанесения покрытия на зубья шестерни – б

нок, размещают микрофон в вертикальной плоскости в 0,25м от зоны зацепления и на режимах испытаний производят измерение шума (3-4 замера на каждом режиме испытаний). После этого зубчатую пару снимают со станка и на рабочем профиле зубьев формируют композиционный слой методом механического плакирования гибким инструментом. Модифицированную зубчатую пару снова устанавливают на шумообкатной станок и повторяют цикл измерений.

Испытания проводили без смазки, при скорости вращения шпинделя  $990\text{мин}^{-1}$  и  $1200\text{мин}^{-1}$  и незначительной нагрузке, обеспечивающей безотрывную работу зубьев при пересопрежении.

Эффективность поверхностного модифицирования определяют по разности между уровнями шума исходной и модифицированной пар.

Измерение шума (общий уровень с частотной коррекцией по характеристике А и треть-октавный спектр), а также его анализ проводились с помощью шумомера фирмы "Брюль и Кьер" мод. 2238 "Медиатор" и программного обеспечения "Noise Explorer 7815". При спектральном анализе фиксировались максимальный  $L_{\max}$ , минимальный  $L_{\min}$  и эквивалентный  $L_{\text{eqv}}$  уровень шума в полосе измерения. Уровень шумового фона в цеху при измерениях не превышал 75дБА, что на 12-15дБА ниже минимального уровня шума, излучаемого испытываемыми зубчатыми парами.

**Результаты исследований.** Анализ полученных спектров уровня шума зубчатых передач с различными видами покрытий на рабочих поверхностях зубьев показывает, что нанесенные покрытия в ряде случаев значительно меняют общий характер распределения звуковой энергии по частотам, снижая уровень шума на одних частотах и оставляя его неизменным или даже повышая на других, при этом общий уровень шума  $L_{\text{eqv}}$  может снижаться в пределах 3-6дБ.

Эффективность применения модифицирования рабочего профиля зубьев оценивали по разности

$$\Delta L = L_{\text{исх}} - L_{\text{мод}},$$

где  $L_{\text{исх}}$ ,  $L_{\text{мод}}$  – уровень шума соответственно исходной и модифицированной зубчатых пар.

При  $\Delta L \geq 0$  наблюдается положительный эффект от модифицирования ра-

бочего профиля зубьев зубчатых колес композиционным слоем; при  $\Delta L \leq 0$  – модифицирование зубчатой пары не способствует снижению уровня шума.

На рисунках 3-6 приведены значения показателя эффективности  $\Delta L$  для всех испытываемых покрытий в исследуемом спектре частот при частоте вращения  $1200 \text{ мин}^{-1}$ .

Из рисунков 3-6 видно, что максимальное улучшение шумовых характеристик при работе конической зубчатой пары обеспечивается при использовании покрытия из спеченной бронзы БрО5С20Гр0,5ДМ0,5, легированной компонентами твердой смазки. За исключением нескольких частот, во всем спектре наблюдается снижение уровня шума испытываемой конической пары по сравнению с парой без покрытия. Наиболее заметное снижение уровня шума при работе конической пары с покрытием из БрО5С20Гр0,5ДМ0,5 наблюдается в диапазоне частот 25-80 Гц – 3,5-7,0 дБ, а также при частотах свыше 2000 Гц – 3-4,5 дБ (см. рисунок 3).

Следует отметить, что при использовании покрытия из литой оловянной бронзы БрО10С10 больший эффект замечен, когда покрытие нанесено на зуб-

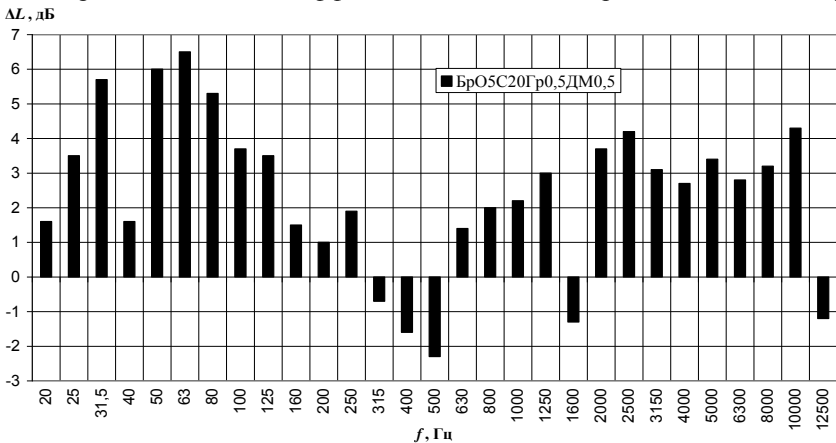


Рисунок 3 – Зависимость показателя эффективности  $\Delta L$  от частоты для зубчатых колес с однослойным покрытием из спеченной бронзы, легированной графитом и дисульфидом молибдена БрО5С20Гр0,5ДМ0,5

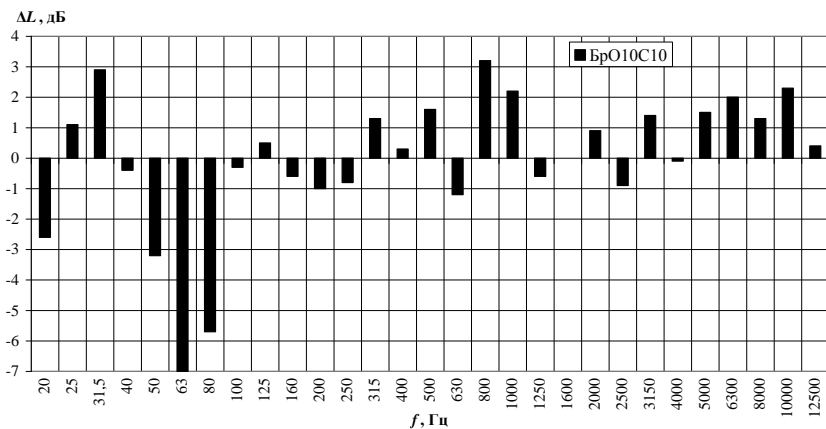


Рисунок 4 – Зависимость показателя эффективности  $\Delta L$  от частоты для зубчатых колес с однослойным покрытием из литой оловянной бронзы BrO10C10

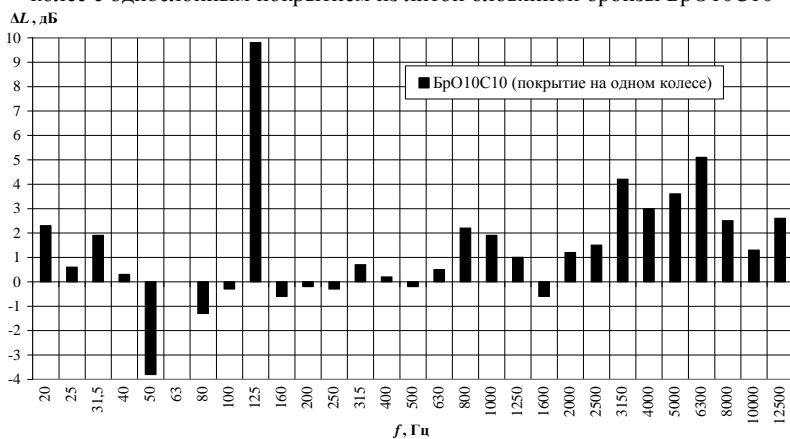


Рисунок 5 – Зависимость показателя эффективности  $\Delta L$  от частоты для зубчатых колес с однослойным покрытием из литой оловянной бронзы BrO10C10, сформированным на одном из колес зубчатой пары

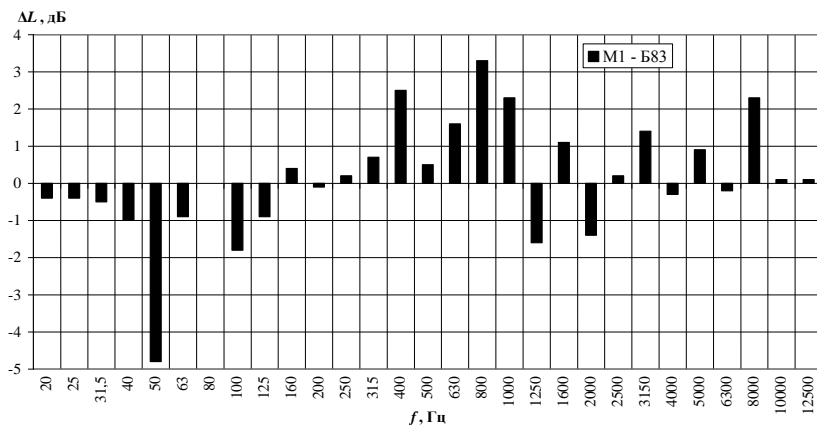


Рисунок 6 – Зависимость показателя эффективности  $\Delta L$  от частоты для испытываемых зубчатых колес с двухслойным покрытием из последовательных слоев литой меди М1 и баббита В83

чатый венец только одного из колес зубчатой пары (см. рисунки 4,5). В этом случае снижение уровня шума составляет 2-5дБ, а на частоте 125Гц – до 10дБ. Возможно, отличия в эффективности снижения шума при использовании зубчатой пары с покрытием на обоих колесах и на одном из колес связаны с изменением условий приработки и контактирования зубьев при работе конической зубчатой пары.

Также в процессе экспериментальных исследований было установлено, что покрытия, сформированные методом ПГИ из материалов-доноров на основе бронзы БрО10С10, повышают устойчивость конической зубчатой пары к задиру и заеданиям при работе передачи.

**Выводы.** В результате испытаний конических зубчатых колес с композиционным модифицированным слоем, сформированным методом плакирования гибким инструментом на зубчатом венце, установлено, что эффективность применения технологии плакирования гибким инструментом для снижения шума конических зубчатых передач во многом определяется рациональным выбором материала-донора, используемого для формирования покрытия. Результаты экспериментов показали, что нанесенные на зубчатые профили покрытия из различных материалов в ряде случаев значительно меняют общий характер распределения звуковой энергии по частотам, снижая уровень шума на одних частотах и оставляя его неизменным (или даже повышая) на других. Наиболее заметный эффект улучшения виброакустических характеристик колес с плакированным венцом зубьев по сравнению с колесами без покрытия практически во всем спектре частот обеспечивает покрытие Бр05С20Гр0,5ДМ0,5 из спеченной бронзы, легированной компонентами твердой смазки, а также покрытие из литой бронзы БрО10С10, сформированное на одном из колес зубчатой пары (на отдельных частотах). Снижение уровня шума передачи по общему уровню составляет в среднем 3,5-7,0дБ, а на отдельных спектральных составляющих оно достигает 10дБ.

Полученные результаты имеют важное значение для дальнейших исследований, направленных на разработку технологии плакирования венцов зубь-

ев зубчатых передач и связанных с подбором оптимальных составов композиционных материалов-доноров, вида и концентрации легирующих компонентов, а также с последующей апробацией технологии в стендовых и эксплуатационных условиях.

**Список литературы:** 1. *Любарский И.М.* Повышение износоустойчивости тяжело нагруженных шестерен. – М.: Машиностроение, 1965. – 132с. 2. *Бречер Ц. и др.* Нагрузочная способность автомобильных зубчатых передач с покрытием, нанесенным путем осаждения из паровой фазы // Доклады Союза германских инженеров. – 2005. – №1904. – С.107-125. 3. *Берсудский А.Л.* Повышение работоспособности эвольвентных поверхностей зубчатых колес // Вестник машиностроения. – 2005. – №1. – С.10-13. 4. *Белевский Л.С. и др.* Фрикционное плакирование металлом по металлу. Ч.1. Термопластическая деформация и процессы взаимодействия плакируемой поверхности и плакирующего слоя // Металлург. – 2006. – №10. – С.33-38. 5. *Леванцевич М.А., Максимченко Н.Н., Зольников В.Г.* Повышение эксплуатационных свойств трибосопряжений нанесением покрытий металлическими щетками // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2005. – №1. – С.67-72.

*Поступила в редакцию 29.03.2013*

УДК 621.833; 621.793

**Работоспособность конических зубчатых передач с плакированным венцом зубьев / М.А. Леванцевич, Н.Н. Максимченко // Вісник НТУ "ХПІ".** Серія: Проблеми механічного приводу. – Х.: НТУ "ХПІ". – 2013. – №40(1013). – С.63-69. – Бібліогр.: 5 назв.

Досліджено вплив композиційних покриттів, сформованих на робочому профілі зубів методом плакування гнучким інструментом, на рівень шуму конічних зубчастих передач. Показано, що при раціональному виборі складу матеріалу покриття, виду і концентрації легуючих домішок, а також технологічних параметрів процесу плакування сформований шар сприяє зниженню рівня шуму в передачі в середньому на 3-7дБ, а також підвищує стійкість до задираку і заїдання зубів.

**Ключові слова:** плакування, гнучкий інструмент, покриття, конічна зубчаста пара, матеріал-донор.

The effect of composite coatings, formed on the profile of teeth method cladding by flexible instrument, on the noise level bevel gears is investigated. It is shown that in the rational selection of the composition of the coating material, type and concentration of the alloying additives, as well as the technological parameters of the process cladding formed layer helps to reduce the level of noise in the transmission of the average of 3-7dB, and also increases the resistance to the bully and jamming teeth.

**Keywords:** cladding, flexible tool, coating, bevel gear pair, the material of the donor.

УДК 621.833.6

**В.А. МАТУСЕВИЧ**, главный конструктор-директор ГП "ХАКБ", Харьков;  
**Ю.В. ШАРАБАН**, заместитель главного конструктора ГП "ХАКБ";  
**А.В. ШЕХОВ**, старший научный сотрудник НАКУ "ХАИ", Харьков;  
**В.Т. АБРАМОВ**, к.т.н., доцент НАКУ "ХАИ"

## ОПТИМАЛЬНОЕ ЧИСЛО СТУПЕНЕЙ МНОГОСТУПЕНЧАТОГО ПЛАНЕТАРНОГО МЕХАНИЗМА ТИПА $n \times AI$

Рассмотрена методика определения оптимального числа ступеней многоступенчатого планетарного механизма в зависимости от его общего передаточного отношения с учетом условий контактной прочности.

**Ключевые слова:** планетарный механизм, контактная прочность.

**Постановка проблемы.** Среди механизмов приводов систем управления летательных аппаратов наибольшее распространение получили многоступенчатые планетарные механизмы типа  $n \times AI$ . Применение в качестве их базовой ступени планетарного механизма схемы  $AI$  позволяет при одинаковых

© В.А. Матусевич, Ю.В. Шарабан, О.В. Шехов, В.Т. Абрамов, 2013