

УДК 621.822.5

В.И. НАЗИН

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗМЕРОВ ВЕРТОЛЕТНЫХ РЕДУКТОРОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ЗАЦЕПЛЕНИЯ

*Приведен анализ различных способов, используемых при проектировании главных редукторов вертолетов и позволяющих уменьшить габариты и вес трансмиссии вертолета. Рассматривались различные материалы, используемые при изготовлении редукторов и различные типы зацеплений зубчатых колес. Отмечено, что применение композиционных материалов в вертолетостроении позволяет уменьшить массу вертолета и стоимость, а также улучшить летные характеристики. Показано, что на размеры и габариты редукторов вертолетов оказывает существенное влияние применение различных типов зацеплений в зубчатых передачах. Отмечено, что применение зацепления Новикова в зубчатом редукторе вместо эвольвентного позволяет уменьшить межосевые расстояния в зубчатых цилиндрических передачах. Существенное влияние на размеры редуктора оказывают применяемые материалы и их термообработка. Результаты расчета показали также, что выигрыш в габаритах и массе вертолетного редуктора получается больше при меньших передаваемых мощностях.*

**Ключевые слова:** *прочность, работоспособность, габариты и вес, эвольвентное зацепление, зацепление Новикова, редуктор, композиционные материалы.*

### Введение

За последние годы вертолетостроение стало бурно развиваться в силу ряда причин. При проектировании вертолетов, как и других летающих объектов, уделяется большое внимание уменьшению габаритов и веса конструкции. Масса трансмиссии составляет в среднем 10% массы вертолета, масса главного редуктора вертолета – около 75% массы всей трансмиссии вертолета.

Детали передач вертолетов работают в сложных условиях эксплуатации. Поэтому к ним предъявляются жесткие требования по работоспособности. Работоспособность заключается в способности детали выполнять заданные функции в пределах технических требований. Работоспособность является первым условием обеспечивающим надежность деталей и оценивается по критериям прочности, жесткости, износостойкости, вибростойкости, теплостойкости и др. Для каждой детали определен критерий является основным.

Прочность – главный критерий оценки работоспособности. Она определяет способность деталей выдерживать нагрузки без разрушений. Стремление к минимальным габаритным размерам и массе трансмиссии приводит к работе деталей при высоких напряжениях. Практика показывает, что в этих условиях возможны различные виды разрушения деталей. Наиболее частыми являются усталостные разрушения, происходящие при переменных нагрузках в глубине или на поверхности детали.

С увеличением скоростей современных машин становится все более важным при проектировании инженерных конструкций проводить исследования колебаний возникающих в них. Поэтому критерий виброустойчивости приобретает все большее значение. Вибрации приводят к повышенному изнашиванию, разрушению в особенности при резонансе. Для повышения виброустойчивости изменяют динамику системы, повышают жесткость отдельных деталей, уравнивают детали или вводят демпферы и т.п. только используя теорию колебаний можно определить наиболее благоприятные размеры конструкции, когда рабочие режимы машины отдалены на сколько это возможно, от критических режимов, при которых могут возникнуть опасные колебания.

Одним из способов улучшения весовых характеристик вертолетов является применение специальных материалов. Создание вертолетов на качественно новом уровне требует применения новых материалов с более высокими абсолютными и относительными показателями. Применение композиционных материалов (КМ) на основе стеклянных, углеродных, борных и органических волокон позволяет улучшить летно-технические характеристики вертолетов. Изготовление различных агрегатов из композиционных материалов значительно снижает количество крепежных деталей.

В настоящее время рядом зарубежных фирм предпринимаются попытки изготовить вертолеты полностью из КМ. В США разрабатывается демонстрационный вертолет ASTD со взлетной массой

3600...4500 кг, выполненный полностью из КМ [1]. Вертолет ASTD будет иметь следующие преимущества по сравнению с вертолетом из металла: уменьшение количества деталей крепежа с 25 до 6 тыс., прочих деталей с 1500 до 400, уменьшение массы на 18%, уменьшение стоимости на 10%, снижение эксплуатационных расходов на 10%, улучшение летных характеристик. Однако композиционные материалы имеют один из существенных недостатков – «старение», т.е. изменение механических свойств с течением времени.

Снижения габаритов и веса трансмиссии вертолета можно достигать также применением различных типов зацеплений в механических передачах редукторов вертолетов. В настоящее время широкое распространение в механических передачах получила эвольвентная система зацепления. Однако она имеет некоторые недостатки:

- а) малые приведенные радиусы кривизны рабочих поверхностей;
- б) повышенную в связи с линейным контактом чувствительность к перекосам;
- в) существенные потери на трение в зацеплении в связи со значительным скольжением.

Эти недостатки уменьшены в зацепления Новикова. Передачи Новикова обладают повышенной контактной несущей способностью по сравнению с эвольвентными в 1,5...2 раза.

Это вызвано большой площадкой контакта и повышенной удельной несущей способностью масляного клина между зубьями.

Последнее связано с тем, что скорость качения направлена перпендикулярно к линии контакта и в несколько раз превышает таковую в эвольвентном профиле.

Передачи Новикова получили распространение в редукторах общего назначения, в судостроении и в ряде других отраслей машиностроения.

В связи с циклическим изменением опорных реакций в обычных косозубых передачах Новикова следует считать перспективным для быстроходных мощных машин шевронные передачи Новикова или передачи Новикова с арочным зубом, обеспечивающие постоянство реакций.

Применение передач Новикова начались с передач с одной линией зацепления (ОЛЗ), а в настоящее время в основном применяют передачи с двумя линиями зацепления (ДЛЗ). В передачах с одной линией зацепления профиль зуба одного колеса (как правило, шестерни) делается выпуклым, а другого – вогнутым. Если ведущим является зубчатое колесо с выпуклым профилем, то точка контакта расположена за полюсом и передачу называют заплоской. Если ведет колесо с вогнутым профилем, то передача становится дополос-

ной. Выпуклый профиль располагается вне начальной окружности, что позволяет делать шестерню без врезания в вал при значительно меньшем числе зубьев, чем при эвольвентном профиле. Радиусы кривизны профилей выбирают весьма близкими по абсолютной величине. В результате приработки обеспечивается касание по высоте зубьев, близкое к линейчатому.

Передачу с двумя линиями зацепления можно представить как сочетание дополосной и заплоской передачи.

Головки зубьев шестерни и колеса имеют выпуклый профиль, а ножки – вогнутый. Для нарезания выпуклых и вогнутых зубьев требуются разные инструменты. Зубья передач с двумя линиями зацепления нарезают одним инструментом. Эти передачи обладают большой контактной и изгибной прочностью.

Основное применение в настоящее время получили передачи Новикова с двумя линиями зацепления с исходным контуром по ГОСТ 1503-76 и перспективными контурами ДЛЗ 1,0 – 0,15 и ДЛЗ 0,7 – 0,15.

Контур по ГОСТ 1503-76 распространяется на передачи твердостью не больше 320 НВ с модулем  $m \leq 16$  мм и окружной скоростью  $V \leq 20$  м/с.

Более высокие показатели обеспечивают контуры ДЛЗ 1,0 – 0,15 и ДЛЗ 0,7 – 0,15.

Контур ДЛЗ 1,0 – 0,15 с радиусами профилей в долях от нормального модуля 1,0 и 1,15 применяют при твердости зубьев не больше 40 HRC.

Контур ДЛЗ 0,7 – 0,15 с радиусами профилей 0,7 и 0,85 применяют при твердости не меньше 45 HRC.

Передачи с контуром ДЛЗ 1,0 – 0,15 проверены в эксплуатации при окружных скоростях до 98 м/с.

В настоящее время исследуются передачи Новикова с высокой твердостью активных поверхностей. Разработан и утвержден ОСТ на исходный контур твердых поверхностей Новикова.

## Результаты исследований

В данной работе был приведен сравнительный анализ габаритных размеров главного редуктора вертолета кинематической схемы МИ-1 [2], приведенной на рис. 1.

В рассматриваемом редукторе частота вращения входного вала, приводимого в движение двигателем, обозначена  $n_{дв}$ . Подводимая к редуктору мощность разделяется на два потока. Небольшая мощность (примерно 10...20%) передается на хвостовой винт, обороты которого обозначены  $n_{хв}$ . Остальная мощность передается на главный винт, обороты которого обозначены  $n_{в}$ .

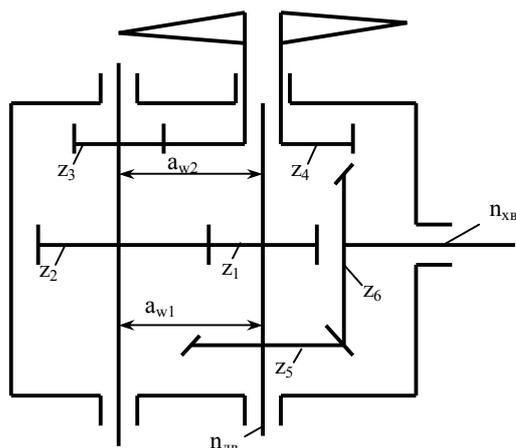


Рис. 1. Кинематическая схема исследуемого главного редуктора вертолета

Для передачи движения на хвостовой винт используется коническая ортогональная передачи, а на главный винт – двухступенчатый цилиндрический соосный редуктор. Рассматривались два случая: двухступенчатый соосный цилиндрический редуктор с эвольвентными зубчатыми колесами и аналогичный редуктор с зацеплением Новикова.

Исследования вертолетного редуктора проводились для различных значений передаваемых мощностей (от 200 до 1000 кВт) и различных материалах зубчатых колес (для сталей 40X и 20X2H4A). Частота вращения вала двигателя принималась  $n_{дв} = 4000 \text{ мин}^{-1}$ , а вала винта –  $n_{в} = 300 \text{ мин}^{-1}$ . Для каждой мощности передаточное отношение распределялось между цилиндрическими ступенями таким образом, чтобы были одинаковые межосевые расстояния  $a_{w1} = a_{w2}$  (рис. 1). При определении межосевых расстояний использовались формулы для определения диаметров зубчатых колес из условия контактной прочности, приведенные в учебном материале [3].

Результаты расчетов приведены на рис. 2 и 3.

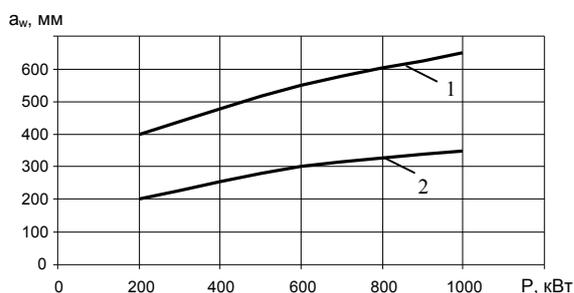


Рис. 2. Зависимость межосевого расстояния  $a_w$  от мощности  $P$  для стали 40X (улучшенной):  
1 – для зубчатых колес с эвольвентным зацеплением;  
2 – для зацепления Новикова

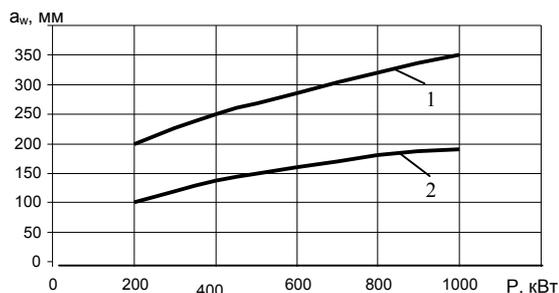


Рис. 3. Зависимость межосевого расстояния  $a_w$  от мощности  $P$  для стали 20X2H4A (цементуемой):  
1 – для зубчатых колес с эвольвентным зацеплением;  
2 – для зацепления Новикова.

## Выводы

Анализ полученных результатов показывает, что в рассмотренном диапазоне мощностей при различных материалах зубчатых колес межосевое расстояние  $a_w$  для зацепления Новикова меньше, чем для зубчатых колес с эвольвентным зацеплением в 1,75...2 раза. Причем больший выигрыш в габаритах получается при меньших мощностях (в данном случае  $P = 200 \text{ кВт}$ ).

Сравнивая межосевые расстояния при различных материалах следует отметить, что межосевое расстояние для цементуемой стали 20X2H4A меньше, чем для улучшенной стали 40X для зубчатых колес с эвольвентным зацеплением в 1,8...2 раза, а для зацепления Новикова в 2 раза. Причем больший выигрыш в габаритах получается для двух рассмотренных материалов при меньших мощностях (в данном случае при  $P = 200 \text{ кВт}$ ).

Приведенный анализ показывает необходимость применения зацепления Новикова для вертолетных редукторов, так как оно существенно влияет на габариты и вес редуктора.

## Литература

1. Бушмарин Л.Б. *Механические передачи вертолетов: (монография)* / Л.Б. Бушмарин и др.; под ред. В.Н. Кестельмана. – М.: Машиностроение, 1983. – 120 с.
2. Вулгаков Э.Б. *Авиационные передачи и редукторы: справочник* / Э.Б. Вулгаков. – М.: Машиностроение, 1981. – 374 с.
3. Решетов Д.Н. *Детали машин: учебник* / Д.Н. Решетов. – М.: Машиностроение, 1987. – 496 с.

Поступила в редакцию 19.05.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. кафедры Л.Г. Бойко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского «ХАИ», Харьков.

### ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ РОЗМІРІВ ВЕРТОЛІТНИХ РЕДУКТОРІВ З РІЗНИМИ ТИПАМИ ЗАЧЕПЛЕННЯ

*V.I. Nazin*

Приведений аналіз різних способів, використовуваних при проектуванні головних редукторів вертольотів і дозволяючих зменшити габарити і вагу трансмісії вертольота. Розглядалися різні матеріали, використовувані при виготовленні редукторів і різні типи зачеплень зубчастих коліс. Відмічено що застосування композиційних матеріалів у вертолетобудуванні дозволяє зменшити масу вертольота і вартість, а також поліпшити льотні характеристики. Показано, що на розміри і габарити редукторів вертольотів чинить істотний вплив застосування різних типів зачеплень в зубчастих передачах. Відмічено, що застосування зачеплення Новикова в зубчастому редукторі замість евольвентного дозволяє зменшити міжосьові відстані в зубчастих циліндричних передачах. Істотний вплив на розміри редуктора роблять вживані матеріали і їх термообробка. Результати розрахунку показали також, що вигреш в габаритах і масі вертолітного редуктора виходить більше при менших передаваних потужностях.

**Ключові слова:** міцність, працездатність, габарити і вага, евольвентне зачеплення, зачеплення Новикова, редуктор, композиційні матеріали.

### COMPARATIVE ANALYSIS OF SIZES OF HELICOPTER REDUCING GEARS WITH DIFFERENT TYPES OF HOOKING

*V.I. Nazin*

An analysis over of different ways, used for planning of main reducing gears of helicopters and allowing to decrease sizes and weight of transmission of helicopter is brought. Different materials, used for making of reducing gears and different types of hooking of gear-wheels, were examined. It is marked that application of composition materials in the helicopter engineering allows to decrease mass of helicopter and cost, and also to improve flying descriptions. It is shown that on sizes and sizes of reducing gears of helicopters application of different types of hooking renders substantial influence in gearings. It is marked that application of hooking of Novikov in a toothed reducing gear instead of evolvent allows to decrease interaxle distances in the cylindrical gearings. Substantial influence on the sizes of reducing gear is rendered by the applied materials and their heat treatment. The results of calculation showed also, that winning in sizes and mass of helicopter reducing gear turns out anymore at less transferrable powers.

**Keywords:** durability, capacity, sizes and weight, evolvent hooking, hooking of Novikov, reducing gear, composition materials.

**Назін Владимир Иосифович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри теоретической механики и машиноведения Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: dekanat@d2.khai.edu.