

УДК 621.833

В.Е. АНТОНЮК, д-р техн. наук

главный научный сотрудник

E-mail: vladi@tut.by

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 27.04.2017.

ПУТИ ОПТИМИЗАЦИИ ЗАТРАТ НА ПРОИЗВОДСТВО ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС МОБИЛЬНЫХ МАШИН

Приведена информация о тенденциях отечественных и зарубежных технологий изготовления зубчатых колес. Предложен прогнозно-факторный метод для оценки нагруженности зубчатых передач. В качестве оценочных факторов используются нормы точности зубчатого венца и базирования, материал и термообработка, технологический процесс изготовления и способы контроля. По каждому фактору в возможном диапазоне изменений производится расчет ресурса передачи и определяются суммарные затраты. При этом прогнозно-факторный метод используется только для конкретной зубчатой передачи и ставит задачи по уточнению норм ее точности, материала и параметров передачи без существенного изменения базовой конструкции. В результате использования этого метода определяются наиболее рациональные параметры зубчатой передачи в сопоставлении с затратами на изготовление.

Ключевые слова: *затраты на производство, зубчатая передача, зубчатое колесо, нагруженность, нормы точности, материал*

Введение. В Беларуси ежегодно изготавливается свыше 1,2 млн зубчатых колес, от качества которых в значительной степени зависит ресурс и виброакустические характеристики выпускаемых мобильных машин.

Растущие требования к конкурентоспособности современных мобильных машин предъявляют к изготовителям зубчатых передач требования по повышению надежности при снижении трудоемкости изготовления и металлоемкости. За прошедшие 20 лет зарубежное станкостроение создало качественно новые конструкции оборудования и инструмента для производства и контроля зубчатых передач. С учетом этого принципиально изменилась технология изготовления зубчатых передач.

Отечественные изготовители зубчатых передач к настоящему времени закупили свыше 100 единиц современного зубообрабатывающего оборудования, при этом значительную часть этого оборудования составляет зубошлифовальное оборудование для финишной обработки зубьев. При этом предполагалось, что именно закупка зубошлифовального оборудования позволит решить проблемы повышения ресурса и снижения шума зубчатых передач. Однако применение зубошлифования далеко не всегда приводило к существенному снижению шума и повышению ресурса зубчатых передач, поскольку использование современного зубообрабатывающего оборудования с сохранением устаревших стандартов и технологий в ряде случаев оказывается малоэффективными и наиболее ответственные узлы мобильной

техники с зубчатыми передачами по-прежнему закупаются за рубежом.

Современное производство зубчатых колес в зарубежном авто- и тракторостроении отличается от отечественного рядом принципиальных особенностей:

- в зарубежной практике конструкции ответственных зубчатых передач имеют различные модификации профиля и формы зуба, связанные с особенностями и требованиями к их функционированию при эксплуатации;
- зубофрезерование (зубодолбление) является основной операцией, обеспечивающей высокую точность нарезания зубчатого венца;
- для зубофрезерования (зубодолбления) используются червячные фрезы и долбяки класса точности не ниже класса А и АА;
- используется современное термическое оборудование, позволяющее значительно снизить деформации при термической обработке и осуществить окончательное зубошлифование при небольших припусках порядка 0,15–0,20 мм;
- создана и широко используется большая номенклатура станков с ЧПУ для силового алмазного хонингования, что позволяет в массовом производстве заменить зубошлифование алмазным зубохонингованием, при котором практически полностью сохраняется полученный при химико-термическом упрочнении поверхностный слой;
- для контроля зубчатых колес широко используется двухпрофильный контроль на межцентромерах с записывающими устройствами, позволяющими

исключить ошибки контролера, хранить и статистически обрабатывать информацию о фактической точности зубчатых передач и тенденциях ее изменения, анализ которых позволяет осуществить своевременную подналадку оборудования.

У отечественных изготовителей зубчатых передач мобильных машин приведенные выше особенности производства зубчатых колес, как правило, не используются. При этом не оценивается эффективность затрат на закупку современного дорого зарубежного оборудования в сопоставлении с достигаемой эффективностью от его использования.

Необходимо отметить, что зарубежные изготовители зубчатых колес в настоящее время сокращают использование зубошлифования как дорогой и затратной операции, в результате которой уменьшается толщина упрочненного слоя на рабочих поверхностях зубьев, увеличение которого для создания припуска под шлифование тоже обуславливает удорожание изделия и далеко не всегда способствует повышению точности. Отечественные изготовители, наоборот, закупают в основном зубошлифовальное оборудование с мотивацией необходимости повышения точности зубчатых передач и, как следствие, решения проблем, связанных с точностью и надежностью. Однако оценка полученных результатов в ряде случаев показывает, что использование этого оборудования не позволило решить проблемы шума и надежности зубчатых передач, т. е. закупка отдельных видов дорогостоящего зарубежного оборудования с ограниченным комплектом не изготавливаемого отечественными производителями инструмента не всегда рационально.

Анализ конструкторской документации и технологических процессов изготовления идентичных зубчатых передач на отечественных предприятиях свидетельствует об отсутствии единого подхода к обеспечению требований по шуму, надежности и уровню затрат при производстве зубчатых передач. Эти требования рассчитываются и задаются конструктором с учетом соответствующих методик.

Остановимся на некоторых особенностях отечественных методик назначения норм точности и соответственно оценки несущей способности зубчатых передач, как основного показателя работоспособности трансмиссии мобильной машины.

Методы оценки несущей способности зубчатых передач базируются на официально действующем ГОСТ 21354-87 «Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность» [1], который включает расчеты изгибной и контактной прочности, контактной и изгибной выносливости, в том числе глубинной контактной выносливости.

Помимо официально признанных стандартов используются стандарты предприятий, основанные

на методиках расчета прочности и ресурса зубчатых передач, предложенных Кудрявцевым В.Н. [2, 3], Решетовым Д.Н. [4], Вулгаковым Э.Б. [5], Кистьяном Я.Г. [6], Цитовичем И.С. [7]. В последнее время широко рекламируются программные средства для проектирования и расчетов зубчатых передач KISSsoft, Hexagon, T-FLEX CAD, КОМПАС, Jahnelt Kestermann, MDESIGN, НТЦ «АПМ» и т. д. Однако при выполнении расчетов по этим методикам прочности и ресурса зубчатых передач получается довольно большое расхождение в результатах.

В 1986 году в связи с подготовкой новой редакции ГОСТ 21354-75 Кудрявцев В.Н. отмечал, что на несущую способность и ресурс зубчатых передач влияет множество взаимосвязанных факторов, в связи с чем возникают расхождения в результатах при использовании различных методик расчета [8]. В 1989 году в связи с изданием новой редакции ГОСТ 21354-87 Кудрявцев В.Н. и Решетов Д.Н. отмечали ряд существенных недостатков и рекомендовали при использовании этого стандарта относиться к нему «со здоровым скептицизмом» и не «бездумно пользоваться расчетами, особенно при экстремальных значениях параметров» [9]. Из этой информации можно сделать вывод, что не существует методик и программ по расчету несущей способности зубчатых передач, гарантирующих полное совпадение расчетных и эксплуатационных характеристик.

Современное производство зубчатых передач в условиях мировой конкуренции требует обеспечения высоких технических показателей зубчатых передач не любой ценой, а только при достижении конкурентной себестоимости. Совместить эти два противоречивых требования возможно за счет взаимопонимания и работы в одной команде конструктора — технолога — испытателя зубчатых передач. Знакомство с опытом работы зарубежных изготовителей зубчатых передач показывает, что высокие достижения в производстве зубчатых передач являются результатом именно совместной работы таких специалистов.

К наиболее полным обзорам различных конструктивных и технологических факторов зубчатых передач следует отнести работу [10], где в описательном виде оценивается влияние различных факторов на работоспособность зубчатых передач. По своему подходу эту работу можно считать первой попыткой создать прогнозно-факторный метод оценки нагруженности зубчатых колес.

Будем надеяться, что в будущем такие методы будут разработаны, однако для настоящего времени для работы с конкретными зубчатыми передачами предлагается прогнозно-факторный метод оценки нагруженности зубчатых колес, но уже не в описательном виде, а на основе расчетно-прогнозируемой оценки каждого фактора.

Основные положения прогнозно-факторного метода оценки нагруженности зубчатых передач [11].

Первый этап. Базовый расчет нагруженности зубчатой передачи. На основе конструкторской документации на ведущее и ведомое зубчатое колесо и заданных режимов нагружения выполняются базовые расчеты изгибной и контактной прочности для оценки несущей способности зубчатой передачи по ГОСТ 21354-87 или по методике, которая используется на конкретном предприятии для этих целей.

Второй этап. Оценка нагруженности зубчатых колес. Формируется перечень факторов, которые взаимосвязаны с изготовлением зубчатых передач и могут оказывать влияние на ресурс и величину затрат. К основным из них можно отнести:

- материал и его свойства (варьирование свойств в пределах выбранной марки материала);
- термообработка и свойства упрочненного слоя и сердцевины зуба (варьирование свойств в пределах допусков на параметры, характеризующие упрочненный слой и сердцевину зуба);
- точность зубчатого венца;
- точность базирования под нагрузкой;
- режим нагружения, а также ряд других факторов, которые определяются величинами в определенном диапазоне.

К факторам, которые могут оказывать влияние на величину затрат при изготовлении зубчатых планетарных передач, относятся:

- материал и его цена;
- затраты на получение заготовки;
- затраты на термообработку;
- затраты на достижение точности зубчатого венца;
- затраты на обеспечение точности базирования под нагрузкой;
- затраты на обеспечение гарантированного ресурса, а также ряд других факторов, которые определяются величинами в определенном диапазоне.

Далее выполняются расчеты по оценке несущей способности зубчатых передач для всего диапазона изменения параметров каждого фактора, который может оказывать влияние на ресурс зубчатых передач и затраты при их изготовлении; устанавливается степень влияния каждого фактора на обеспечение требуемой характеристики передачи (ресурс, запас прочности) и затраты на изготовление.

В результате анализа выполненных расчетов устанавливается наиболее рациональное соотношение между характеристиками нагруженности зубчатой передачи и затратами на ее изготовление. При этом можно воспользоваться методами оптимизации, приведенными в работе [12].

Пример использования прогнозно-факторного метода оценки нагруженности зубчатой передачи. В таблице приведены фрагменты результатов расчетов контактных и изгибных напряжений для различных материалов, точности изготовления и положения осей зубчатой передачи модулем 12 и числом зубьев $z_1 = 21$, $z_2 = 30$.

Для расчетов были приняты следующие варианты режима нагружения, точности и материалов зубчатых колес:

- расчетная окружная сила на ведущей шестерне — 273 727 Н;
- материал — сталь 20Х2Н4А и 20ХН3А;
- степени точности — 7-я, 8-я и 9-я;
- коэффициент динамической нагрузки — 1,15 и 1,25;
- ресурс работы с максимальной нагрузкой — 5000, 10 000 и 25 000 ч;
- смещения контактных линий в зацеплении «ведущая и ведомая шестерни» — до 0,2 мм.

Приведенные выше расчеты и их анализ приводит к следующим выводам:

- основное влияние на несущую способность анализируемого зацепления оказывает смещение осей зубчатых колес;
- материал зубчатых колес не оказывает существенного влияния на несущую способность зубчатых колес, в связи с чем имеется возможность использовать более дешевые марки сталей;
- влияние точности зубчатых колес для заданного режима нагружения не оказывает существенного влияния на несущую способность зубчатых колес, в связи с чем появляется возможность использования более грубых норм точности и дешевых технологий без зубошлифования.

В результате проведенного анализа с использованием предлагаемого прогнозно-факторного метода выбирается вариант зубчатой передачи из более дешевой марки стали 20ХН3А и технологический процесс изготовления без зубошлифования, однако с введением продольной модификации зуба, в результате обеспечивается равноценный ресурс по сравнению с использованием зубошлифования и стали 2Х2Н4А.

Следует отметить, что выводы при использовании прогнозно-факторного метода применимы только для конкретной зубчатой передачи и не имеют характера общих рекомендаций. В результате использования прогнозно-факторного метода ставятся задачи по уточнению норм точности, материала и параметров конкретной зубчатой передачи с целью снижения затрат на изготовление без существенного изменения базовой конструкции.

Заключение. Использование методик оценки нагруженности зубчатых колес без учета возможностей варьирования параметрами зубчатой передачи может привести к существенным ошибкам в оценке их нагруженности и повышенным затратам на изготовление. Вместе с тем к одному из основных требований современного производства зубчатых передач в условиях мировой конкуренции можно отнести требование к обеспечению высоких технических показателей зубчатых передач при минимальных затратах на их производство. В связи с этим для конкретизированных зубчатых передач при их проектировании целе-

Таблица — Фрагменты результатов расчетов контактных и изгибных напряжений для вариантов различных материалов, точности изготовления и положения зацепления ведущей и ведомой шестерни

Вид расчетов	Графическое представление результатов расчетов	Выводы о степени влияния	Принимаемые решения по оптимизации затрат на производство зубчатой передачи
Контактные напряжения в зависимости от материала и долговечности	<p>Расчетное контактное напряжение 1141 МПа 20X2H4A 1134 МПа 20XH3A</p> <p>Допускаемое контактное напряжение 20X2H4A 20XH3A</p>	Сталь 20X2H4A по сравнению со сталью 20XH3A имеет преимущество около 1 % по контактным напряжениям	Использовать сталь 20XH3A по цене 57 000 RUB за 1 тонну взамен стали 20X2H4A по цене 63 000 RUB за 1 тонну
Напряжения изгиба в зависимости от точности, материала и долговечности	<p>Допускаемые напряжения изгиба: 7-я степень - 449 МПа, 8-я степень - 427 МПа, 9-я степень - 408 МПа, 10-я степень - 388 МПа</p> <p>Расчетное напряжение изгиба: 10-я степень - 440 МПа, 9-я степень - 408 МПа, 8-я степень - 388 МПа, 7-я степень - 375 МПа</p>	Влияние точности изготовления зубчатых колес в пределах от 7-й до 9-й степеней составляет 9 % по напряжениям изгиба	Назначить для ведущего и ведомого зубчатых колес степень точности 8-7-7, которая достигается без использования зубошлифования
Изгибные напряжения в зависимости от материала и смещений	<p>Расчетное изгибное напряжение 395 МПа 20X2H4A 554 МПа 20XH3A</p> <p>Допускаемое напряжение изгиба 20X2H4A 20XH3A</p>	Решающее влияние на соотношение расчетных и допускаемых изгибных напряжений имеет смещение положения осей шестерен и достигает 40 % по напряжениям изгиба	Для компенсации влияния смещения положений шестерен использовать продольную модификацию (бочкообразность) на ведущей шестерне с уточнением точности по нормам пятна контакта 8-7-7*

сообразно использование прогнозно-факторного метода оценки ее нагруженности с учетом минимизации затрат на изготовление.

При решении технически сложных задач достижения требуемого качества изготовления, организации измерений и контроля зубчатой передачи необходима согласованная работа группы специалистов, включающей конструктора зубчатой передачи, технологов по механической обработке, упрочнению и сборке зубчатых колес в узле, специалистов по зубообрабатывающему инструменту, наладчиков зубообрабатывающего оборудования, испытателей коробок передач или

трансмиссий. Целесообразно наличие технически оснащенной лабораторной и измерительной базы для оценки геометрических и шумовых характеристик передачи, а также стендового оборудования для возможности испытаний проектируемой передачи под нагрузкой. Результаты проведения этих испытаний позволяют технически и экономически обоснованно принять решение об эффективности использования технического решения, разработанного с использованием прогнозно-факторного метода оценки нагруженности проектируемой зубчатой передачи с учетом минимизации затрат на изготовление.

Список литературы

1. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность: ГОСТ 21354–87. — Введ. 01.01.89. — М.: Изд-во стандартов, 1988. — 128 с.
2. Кудрявцев, В.Н. Конструкция и расчет зубчатых редукторов: справ. пособие / В.Н. Кудрявцев, Ю.А. Державец, Е.Г. Глухарев. — М.: Машиностроение, 1971. — 328 с.
3. Кудрявцев, В.Н. Планетарные передачи / В.Н. Кудрявцев. — М.: Машиностроение, 1968. — 308 с.
4. Решетов, Д.Н. Детали машин / Д.Н. Решетов. — М.: Машиностроение, 1989. — 496 с.
5. Вулгаков, Э.Б. Соосные зубчатые передачи: справ. / Э.Б. Вулгаков. — М.: Машиностроение, 1987. — 256 с.
6. Кистьян, Я.Г. Методика расчета зубчатых передач на прочность / Я.Г. Кистьян; под ред. Е.П. Унскова. — М.: Mashgiz, 1963. — 244 с.
7. Цитович, И.С. Трансмиссии автомобилей / И.С. Цитович, И.В. Каноник, В.А. Вавуло. — Минск: Наука и техника, 1979. — 256 с.
8. Кудрявцев, В.Н. Проблемные вопросы в области оценки несущей способности зубчатых передач / В.Н. Кудрявцев, А.Л. Филиппенков // Вестн. машиностроения. — 1986. — № 9. — С. 12–16.
9. О методах оценки несущей способности цилиндрических зубчатых передач / В.Н. Кудрявцев [и др.] // Вестн. машиностроения. — 1989. — № 9. — С. 29–36.
10. Кораблев, А.И. Повышение несущей способности и долговечности зубчатых передач / А.И. Кораблев, Д.Н. Решетов. — М.: Машиностроение, 1968. — 288 с.
11. Антонюк, В.Е. К вопросу оценки нагруженности зубчатых колес крупногабаритных планетарных передач / В.Е. Антонюк // Металлообработка. Оборудование и инструмент для профессионалов. — 2014. — № 2(164). — С. 50–53.
12. Леоненков, А.В. Решение задач оптимизации в среде MS Excel / А.В. Леоненков. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 704 с.

ANTONYUK Vladimir E., D. Sc. in Eng.

Chief Researcher

E-mail: vladi@tut.by

Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 27 April 2017.

WAYS OF OPTIMIZATION OF EXPENSES FOR MANUFACTURE OF COGWHEELS OF MOBILE MACHINES

The information on tendencies of domestic and foreign manufacturing techniques of cogwheel is provided. The expected and factorial method for an assessment of loading of cogwheel is offered. As estimated factors norms of accuracy of a ring gear and basing, material and heat treatment, technological process of production and modes of control are used. On each factor in the possible range of changes calculation of a resource of drive is made and total expenses are defined. The expected and factorial method is used only for the concrete toothed gearing and sets tasks of specification of norms of accuracy, material and parameters of the concrete toothed gearing without essential change of a basic design. As a result of use of this method optimum parameters of the cogwheel gearing in comparison to costs of production are defined.

Keywords: costs of production, tooth gearing, cogwheel, working capacity, norms of accuracy, material

References

1. GOST 21354–87. *Peredachi zubchatye cilindricheskie jevolventnye vneshnego zacepleniya. Raschet na prochnost* [State Standard 21354-87. Cylindrical involute externally toothed gears. Calculation of strength]. Moscow, Izdatelstvo standartov, 1988. 128 p.
2. Kudryavtsev V.N., Derzhavets Yu.A., Glukharev E.G. *Konstrukcija i raschet zubchatyh reduktorov. Spravochnoe posobie* [Design and calculation of gear reducers. Reference guide]. Moscow, Mashinostroenie, 1971. 328 p.
3. Kudryavtsev V.N. *Planetarnye peredachi* [Planetary transmissions]. Moscow, Mashinostroenie, 1968. 308 p.
4. Reshetov D.N. *Detali mashin* [Machine parts]. Moscow, Mashinostroenie, 1989. 496 p.
5. Vulgakov E.B. *Soosnye zubchatye peredachi: Spravochnik* [Coaxial gear drives: Reference book]. Moscow, Mashinostroenie, 1987. 256 p.
6. Kistyany Ya.G., Unskova E.P. *Metodika rascheta zubchatyh peredach na prochnost* [Method for calculating gears for durability]. Moscow, Mashgiz, 1963. 244 p.
7. Tzitovich I.S., Kanonik I.V., Vavulo V.A. *Transmissii avtomobilej* [Transmission of cars]. Minsk, Nauka i tehnika, 1979. 256 p.
8. Kudryavtsev V.N., Filipenkov A.L. *Problemnye voprosy v oblasti ocenki nesushhej sposobnosti zubchatyh peredach* [Problematic issues in the evaluation of the bearing capacity of gears]. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of Mechanical Engineering], 1986, no. 9, pp. 12–16.
9. Kudryavtsev V.N. [et al.] *O metodah ocenki nesushhej sposobnosti cilindricheskih zubchatyh peredach* [On methods for estimating the bearing capacity of cylindrical gears]. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of Mechanical Engineering], 1989, no. 9, pp. 29–36.
10. Korablev A.I., Reshetov D.N. *Povyshenie nesushhej sposobnosti i dolgovechnosti zubchatyh peredach* [Increase of bearing capacity and durability of gears]. Moscow, Mashinostroenie, 1968. 288 p.
11. Antonyuk V.E. *K voprosu ocenki nagruzhenosti zubchatyh koles krupnogabaritnyh planetarnyh peredach* [On the evaluation of the loading of gears of large-sized planetary gears]. *Metalloobrabotka. Oborudovanie i instrument dlja professionalov* [Metalworking. Equipment and tools for professionals], 2014, no. 2(164), pp. 50–53.
12. Leonenkov A.V. *Reshenie zadach optimizacii v srede* [Solution of optimization problems in the MS Excel environment]. St. Petersburg, BHV-Peterburg, 2005. 704 p.