

АКТУАЛЬНОСТЬ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОГО И КОМПЛЕКСНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТЕЙ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Шелковой А.Н., докт. техн. наук, проф., **Пермяков А.А.**, докт. техн. наук, проф.
(Национальный технический университет «ХПИ», Харьков, Украина)

Новиков Ф.В., докт. техн. наук, проф.
(Харьковский национальный экономический университет им. С. Кузнеця, Харьков, Украина)

Волошин А.И., главный инженер
(ЧАО «Новокраматорский машиностроительный завод», Краматорск, Украина)

Клочко А.А., докт. техн. наук, проф., **Гасанов М.И.**, канд. техн. наук, проф.
(Национальный технический университет «ХПИ», Харьков, Украина)

Повышение технического уровня тяжелых машин и его сохранение в течение заданного периода эксплуатации и послеремонтного цикла являются актуальнейшими задачами современного машиностроения. Решение такой задачи в значительной степени определяется уровнем технологического оснащения при интенсивной и высококачественной обработке ответственных крупногабаритных зубчатых колес и зубчатых венцов диаметром до 15000 мм, модулем от 12 мм до 65 мм рудоразмельных мельниц, поворотных платформ экскаваторов, шагающих экскаваторов, подъемных шахтных машин, прокатных станков, сталелитейных разливочных машин.

Общая имитационная модель формирования и прогнозирования интермиттенции в результате износа формы рабочей поверхности зубьев направлена на разработку средств дифференцированного и комплексного технологического обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей крупномодульных зубчатых колес при помощи системной оптимизации и позволяет научно обосновать изменения качественных характеристик крупногабаритных зубчатых передач в зависимости от времени их эксплуатации, являются актуальными и соответствуют требованиям научно-технического прогресса современного машиностроения.

Ключевые слова: имитационное моделирование, формирование и прогнозирование, интермиттенция, износ, форма зуба, крупногабаритные зубчатые колеса

Підвищення технічного рівня важких машин і його збереження протягом певного періоду експлуатації і післяремонтного циклу є вкрай актуальними завданнями сучасного машинобудування. Рішення такого завдання в значній мірі визначається рівнем технологічного оснащення при інтенсивній і високоякісній обробці відповідальних великогабаритних зубчастих коліс і зубчастих вінців діаметром до 15000 мм, модулем від 12 мм до 65 мм рудорозмельних млинів, поворотних платформ екскаваторів, крокуючих екскаваторів, підйомних шахтних машин, прокатних станів, сталеливарних розливних машин.

Загальна імітаційна модель формування та прогнозування інтерміттенції в результаті зносу форми робочої поверхні зубів спрямована на розробку засобів диференційованого і комплексного технологічного забезпечення експлуатаційних властивостей поверхонь крупномодульних зубчастих коліс за допомогою системної оптимізації та дозволяє науково обґрунтувати зміни якісних характеристик великогабаритних зубчастих передач залежно від часу їх експлуатації, є актуальними і відповідають вимогам науково-технічного прогресу сучасного машинобудування.

Ключові слова: імітаційне моделювання, формування та прогнозування, інтерміттенція, знос, форма зуба, великогабаритні зубчасті колеса

The increase in the technical level of heavy machinery and its preservation during a given period of operation and the post-repair cycle are the most urgent tasks of modern machine building. The solution of this problem is largely determined by the level of technological equipment for intensive and high-quality processing of critical large-sized gears and gear rims with a diameter of up to 15,000mm, a module from 12mm to 65mm of ore-milling mills, rotary platforms of excavators, walking excavators, lifting machines, rolling mills, steel casting machines.

The general simulation model for the formation and prediction of intermittence as a result of wear on the shape of the working surface of the teeth is aimed at the development of means for differentiating and complex technological support of the operational properties of surfaces of coarse-grained gears with the help of system optimization and allows scientifically to substantiate the changes in the quality characteristics of large-sized gears, depending on the time of their operation, are relevant and meet the requirements of scientific and technological Cesky progress of modern engineering.

Keywords: simulation modeling, formation and prediction, intermittence, wear, tooth shape, large-sized gears

Одной из важнейших задач современного тяжелого машиностроения и металлургического производства является выпуск высококачественной, конкурентоспособной на внутреннем и внешнем рынках современной, качественной, высокопроизводительной и ремонтпригодной продукции.

В значительной степени такие требования относятся к тяжело нагруженным машинам, обеспечивающим переработку огромных потоков продукции, таких как горнодобывающие, горно-обогащительные, металлургические, транспортные, шахтные и другие.

Повышение технического уровня тяжелых машин и его сохранение в течение заданного периода эксплуатации и послеремонтного цикла являются актуальнейшими задачами современного машиностроения.

Решение этих задач в значительной степени определяется уровнем технологического оснащения при интенсивной и высококачественной обработке ответственных крупногабаритных зубчатых колес и зубчатых венцов диаметром до 15000 мм, модулем от 12 мм до 65 мм рудоразмельных мельниц, поворотных платформ экскаваторов, шагающих экскаваторов, подъемных шахтных машин (рис. 1), прокатных станков, сталелитейных разливочных машин, тяжело нагруженных редукторов.

В тяжело нагруженных машинах в качестве приводов используются передаточные механизмы, содержащие зубчатые передачи, степень совершенства которых в значительной мере определяет стоимость и эксплуатационные характеристики промышленного оборудования.

Большая часть тяжело нагруженных машин – горные, транспортные, металлургические, шахтные – работают при высоких нагрузках и в условиях значительного запыления окружающей среды и, в том числе, с использованием открытых крупномодульных зубчатых передач. Тяжелые условия работы, динамический, вибрационный характер нагружения этих машин снижают прочность и время эксплуатации зубчатых передач и их приводов.



Рис. 1 – Шахтные подъемные машины типа МПБ с одним цилиндрическим неразрезным барабаном производства ЧАО «НКМЗ»

При работе зубчатой передачи между зубьями сопряженных зубчатых колес возникает сила давления F_n , направленная по линии зацепления. От скольжения зубьев между ними образуется сила трения и, соответственно, износ контактируемых поверхностей (рис. 2):

$$F_{mp} = F_n \cdot f, \quad (1)$$

где f – коэффициент трения.

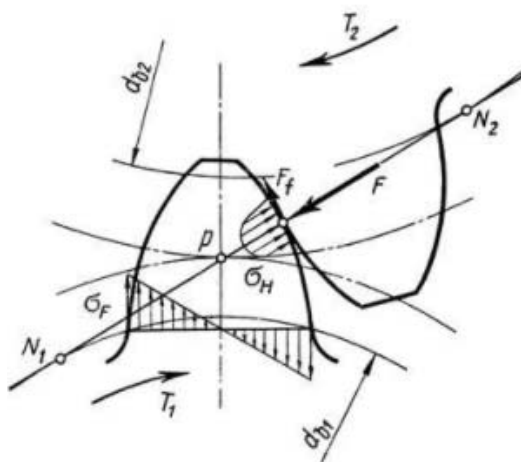


Рис. 2 – Схема распределения сил в момент зацепления

Принимают, что сила F_n направлена по нормали к их профилям. Под действием сил F_n и F_{mp} зубья находятся в сложном напряженном состоянии. Возникают напряжения изгиба δ_f в поперечных сечениях зубьев и контактные напряжения δ_n в поверхностных слоях зубьев. Оба эти напряжения, переменны во времени, и являются причиной усталостного разрушения зубьев или их рабочих поверхностей. Время действия δ_f и δ_n определяется продолжительностью зацепления при повороте колеса на один окружной шаг t_o с учетом накопленной погрешности шага, радиального биения зубчатого венца и погрешности колебания длины общей нормали.

Напряжения изгиба вызывают поломку зубьев, а контактные напряжения усталостное выкрашивание поверхностных слоев зубьев. С контактными напряжениями и трением в зацеплении связаны также износ, заедание и др. виды повреждения поверхностей зубьев.

Оценка долговечности крупногабаритных зубчатых передач по исходным параметрам эвольвентных профилей зубьев без учета технологического обеспечения параметров состояния поверхностного слоя зубчатых колес и восстановленных крупногабаритных зубчатых венцов является весьма приближенной и не отражает того факта, что из-за износа зубьев форма профиля становится отличной от исходной эвольвентной поверхности, в результате чего изменяются нагрузочно-кинематические параметры контакта, которые, в свою очередь, интенсивно изменяют процесс изнашивания и форму профилей зубьев по линии контакта и в поперечном сечении [1, 2, 4].

Общая имитационная модель формирования и прогнозирования интермиттенции в результате износа формы рабочей поверхности зубьев направлена на разработку средств дифференцированного и комплексного технологического обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей крупномодульных зубчатых колес при помощи системной оптимизации и позволяет научно обосновать изменения качественных характеристик крупногабаритных зубчатых передач в зависимости от времени их эксплуатации, являются актуальными и соответствуют требованиям научно-технического прогресса современного машиностроения.

Новый подход прогнозирования погрешностей механической обработки зубчатых колес, базирующийся на принципах суперпозиции, векторном характере составляющих погрешности и методе статистического математического моделирования основывается на методе Монте-Карло.

Отличием реального формообразования от номинального (идеального) является наличие отклонений параметров состояния поверхностного слоя крупногабаритных зубчатых колес реальных профилей от номинальных. Основными конечными задачами, которые должны быть решены при исследовании закономерностей реального формообразования, являются задачи прогнозирования с заданной достоверностью возникающих погрешностей, а также задачи управления, в том числе оптимального этими погрешностями.

Отклонение параметров состояния поверхностного слоя крупногабаритных зубчатых колес, рассматриваются как геометрические погрешности изготовления зубчатых колес [1, 3, 5], так и качественное состояние поверхностного слоя с уровнем обеспечения точности и качества не ниже, чем требуемая, и могут быть сформулированы для геометрических параметров в виде (2):

$$ES_i \leq EI_i \leq f\Delta i(\alpha), \quad (2)$$

где $f\Delta i(\alpha)$ – функция зависимости i -й погрешности зубчатого венца от фазового угла реального профиля зубчатого колеса (α); ES_i – минимальное значение i -й погрешности; EI_i – максимальное значение i -й погрешности.

Таким образом, требования к точности изготовления ЗВ по обеспечению, к примеру кинематической точности, должны состоять из ограничений на радиальное биение и колебание длины общей нормали (согласно ГОСТ 1643-81) и

функциональных зависимостей качественного состояния поверхностного слоя (3) и (4):

$$EI_{HRC} \leq ES_{HRC} \leq f_{HRC}(\alpha); \quad (3)$$

$$EI_h \leq ES_h \leq F_h(\alpha). \quad (4)$$

Таким образом, возникает потребность в получении функциональных дифференцированных и комплексных зависимостей погрешностей от технологических условий формирования поверхностного слоя крупногабаритных зубчатых колес при их изготовлении и восстановлении.

Анализ механизмов формирования погрешностей крупногабаритных зубчатых колес свидетельствует о том, что элементарные погрешности технологических систем операций зубообработки характеризуются случайными числовыми характеристиками, определяющими величину и характер вхождения в соответствующие комплексные составляющие, которые, в свою очередь, взаимодействуя между собой, определяют исследуемые погрешности крупногабаритных зубчатых колес. Так как исследуемые погрешности обработки возникают в результате воздействия ряда случайных факторов, характеристики которых, в зависимости от уровня сложности структурного строения погрешностей, являются величинами или функциями, носящими случайный характер проявления, их определение возможно с использованием методов теории вероятностей.

В соответствии с этим, для решения данной задачи, с целью повышения объективности получаемой информации, экономии временных и материальных затрат, наиболее целесообразным представляется применение методики статистического моделирования (метода Монте-Карло). Исходя из изложенного выше, разработана общая модель формирования крупногабаритных зубчатых колес при механической обработке, геометрическая интерпретация которой показана на рис. 3.

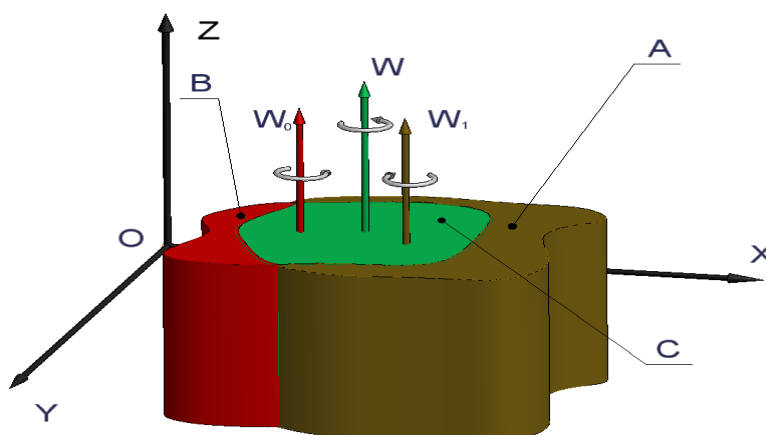


Рис. 3. Общая модель формирования профиля зуба крупномодульного зубчатого колеса при механической обработке:

- A* – пространственный профиль обрабатывающего контура;
- B* – пространственный профиль обрабатываемого контура;
- C* – пространственный профиль образованной формы зуба (контура изделия);
- W₀* – ось концентрации обрабатываемого контура;
- W₁* – ось концентрации обрабатывающего контура;
- W* – ось концентрации образованного контура изделия

Согласно предложенной модели, профиль изделия при механической обработке есть результат пересечения пространственных множеств A и B :

$$C = A + B. \quad (5)$$

Пространственные же множества образуются по принципу суперпозиции в результате имитационного суммирования векторов элементарных составляющих технологических погрешностей и состояния поверхностного слоя контактируемых эвольвентных поверхностей.

Расчетная схема статистического моделирования стохастической модели формирования профиля зуба колеса при изготовлении и восстановлении разбивается на три вида: погрешности, сдвигающие профиль зуба крупномодульного зубчатого колеса в плоскости обработки и тем самым создающие геометрический перекося плоскости обработки и отклонение параметров поверхностного слоя, проворачивающие плоскость обработки и создающие комплексный параметр состояния поверхностного слоя зубчатого колеса.

Выполненные исследования позволяют прогнозировать формы профиля зуба и, соответственно, характеристик (качества работы зубчатых передач тяжело нагруженных машин на основе расширенной теории изнашивания зубьев крупногабаритных зубчатых колес, базирующейся на учете контактного и меняющегося равновесия с учетом технологического обеспечения параметров состояния поверхностного слоя зубьев, интермиттенции в результате износа формы рабочей поверхности зубьев, нагрузочно-кинематическими параметрами контакта (усилие контактного взаимодействия, скорость скольжения, скорость трения-качения), определяющих износ, от времени эксплуатации передачи с обеспечением контакта каждого зуба ведущей шестерни с каждым зубом ведомого колеса в определенной последовательности, что дополнительно стабилизирует и значительно уменьшает отклонение формы зуба в поперечном и продольном сечениях.

Список литературы: 1. Некоторые аспекты имитационного математического моделирования геометрических параметров процесса зубофрезерования / *А.Н. Шелковой, А.А. Клочко, Е.В. Набока, Е.В. Мироненко, А.Н. Кравцов* // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2015. – Вып. 36. – С. 136–149. 2. *Клочко А.А.* Технологическое обеспечение трения качения и трения скольжения в зубчатых передачах / *А.А. Клочко, М.И. Гасанов, Е.В. Басова* // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – №40 (1149). – С. 102–107. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-004X. 3. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. *Ф.В. Новикова и А.В. Якимова* // В десяти томах. – Т. 10. "Концепции развития технологии машиностроения". – Одесса: ОНПУ, 2005. – 565 с. 4. *Шелковой А. Н.* Общие принципы моделирования оптимального управления параметрами точности, качества и производительности зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес / *А. Н. Шелковой, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко* // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Серія «Машиноприладобудування та транспорт». – Севастополь, 2013. – Вип. 140. – С. 203–210. 5. Имитационное моделирование в задачах машиностроительного производства в 2-х томах, Т. 2: учеб. пособие / *А.В. Беловол, А.А. Клочко, Е.В. Набока, А.О. Скоркин, А.Н. Шелковой, под редакцией А.Н. Шелкового.* – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – 323 с. – На русском языке. ISBN 978-966-593-749-4.