

УДК 621.833

Д. А. Забелин

ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И СБОРКИ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ НА ИХ КИНЕМАТИЧЕСКУЮ ТОЧНОСТЬ

В статье рассматривается влияние основных элементарных погрешностей изготовления и сборки зубчатых передач на их кинематическую точность. Исследования проводились на основе 3D-моделирования, позволяющего включать в модель зубчатой передачи любые погрешности изготовления и сборки. Приведены результаты исследования влияния погрешностей зубчатых передач на их кинематическую точность, плавность работы, а также пятно контакта.

Кинематическая точность зубчатых передач зависит прежде всего от качества изготовления составляющих её колес. Кинематическая погрешность передачи, показывающая величины рассогласования углов поворотов ведущего и ведомого звеньев, является комплексным показателем точности и несет информацию о погрешностях изготовления и сборки передач. Выявление первичных погрешностей изготовления и сборки передач по результатам измерений кинематической погрешности является одной из актуальных задач современного машиностроения, связанных с повышением точности изготовления зубчатых передач.

Для оценки влияния погрешностей изготовления и сборки зубчатых передач была разработана методика, заключающаяся в построении 3D-модели зубчатой передачи с последующим моделированием её работы и определением кинематической погрешности [1]. Данная методика

была реализована в графической среде AutoCAD (Autodesk Inc.) с использованием языка программирования Visual Basic for Application. 3D-модели зубчатых колес, составляющих передачу, строятся путем моделирования процесса зубонарезания методом обката. Такой подход к построению моделей колес позволяет включать погрешности изготовления, вызванные различными технологическими причинами, такими как колебания звеньев цепи обката станка, биения режущего инструмента и заготовки, погрешности режущих кромок инструмента и т. д. Погрешности сборки передачи задаются путем смещения рабочих осей вращения либо их отклонением от параллельности. На рис. 1 показана построенная по данной методике 3D-модель зубчатой передачи и график её кинематической погрешности.

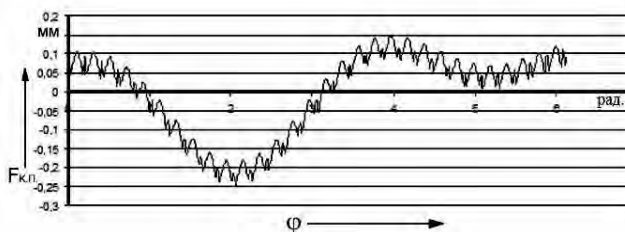
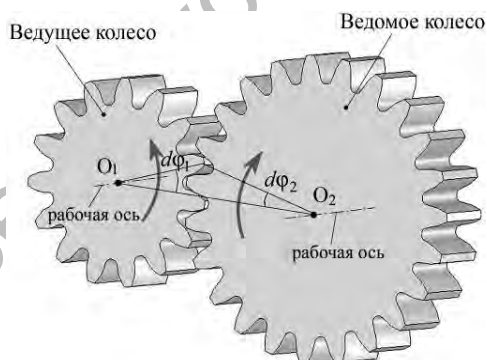


Рис. 1. 3D-модель зубчатой передачи и её кинематическая погрешность

Эксцентриситет оси вращения зубчатых колес передачи может быть вызван в результате погрешностей монтажа колеса на вал (монтажный эксцентриситет) или радиальных погрешностей базирования заготовки на зуборезном станке (геометрический эксцентриситет). На рис. 2, а показан график кинематической погрешности зубчатой передачи и ее амплитудно-частотный спектр при наличии эксцентриситета оси вращения ведомого колеса. Кривая кинематической погрешности представляет собой четкую синусоиду. Эксцентриситет оси вращения ведомого зубчатого колеса четко отражается в спектре в виде первой гармонической составляющей, т. к. данная погрешность проявляется один раз за его полный оборот ведомого колеса. Величина эксцентриситета связана с амплитудой первой гармонической составляющей амплитудно-частотного спектра следующей зависимостью:

$$A_1 = 1,06418 \cdot e, \quad (1)$$

где A_1 – величина первой гармонической

составляющей; e – величина эксцентриситета.

При эксцентриситете оси вращения ведущего колеса кривая кинематической погрешности принимает вид, показанный на рис. 2, б. При количестве зубьев колес моделируемой передачи $z_1 = 18$; $z_2 = 36$ этот вид погрешности четко проявляется в виде второй гармонической составляющей. Это следует из того, что ведущее колесо совершает два полных оборота, т. е. данная погрешность проявляется 2 раза за оборот ведомого колеса (передаточное число $u = 2$). Таким образом, эксцентриситет ведущего зубчатого колеса проявляется в виде гармоники с номером, равным передаточному числу зубчатой передачи. Однако данный случай является частным, т. к. на практике передачи с целыми передаточными числами встречаются достаточно редко. Поэтому на практике она проявляется в виде двух смежных гармоник с номерами, равными округлению передаточного числа в большую или меньшую сторону.

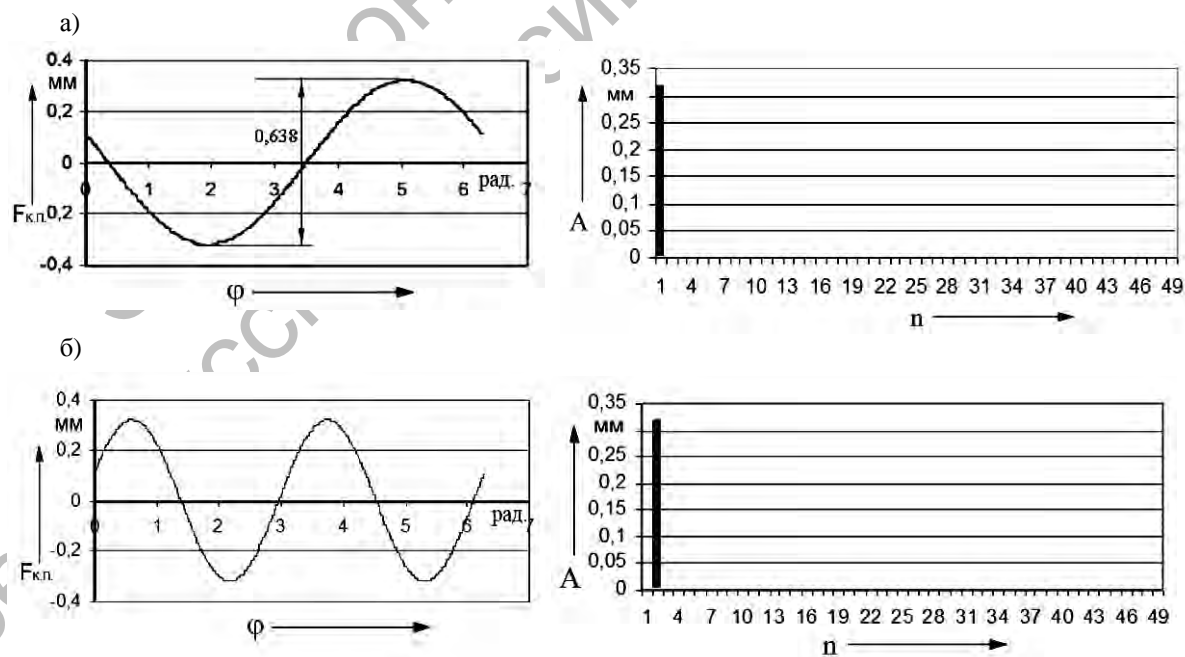


Рис. 2. Графики кинематической погрешности и ее амплитудно-частотные спектры при эксцентриситете вращения ведомого (а) и ведущего (б) зубчатых колес

Для оценки влияния погрешности шага зацепления на кинематическую погрешность передачи была смоделирована работа зубчатой передачи ($z_1 = 15$; $z_2 = 31$; $m = 4,5$ мм) при наличии данной погрешности у ведомого колеса. Ведущее колесо считалось идеальным и строилось без погрешностей. Погрешность шага зацепления возникает в результате изменения радиуса основной окружности вследствие погрешности профиля обрабатываемого инструмента или погрешности скорости обката, например, при зубошлифовании. Погрешность шага зацепления задавалась путем изменения угла профиля инструмента на величину $\Delta\alpha$. При уменьшении номинального угла профиля $\alpha = 20^\circ$ на $\Delta\alpha$ происходит увеличение радиуса основной окружности нарезаемого колеса ($\Delta r_o > 0$). В результате этого, колесо будет обладать положительной погрешностью шага зацепления, т. е. действительный шаг зацеп-

ления превышает номинальный (теоретический). При увеличении номинального угла профиля на величину $\Delta\alpha$ происходит уменьшение радиуса основной окружности ($\Delta r_o < 0$), и у колеса наблюдается отрицательная погрешность шага зацепления.

Графики кинематической погрешности при положительной и отрицательной погрешностях шага зацепления ведомого зубчатого колеса показаны на рис. 3. Как видно из графиков, данный вид погрешности проявляется в виде «пилообразного» сигнала, причем направление наклона зубцов зависит от знака погрешности. Так, при наличии положительной погрешности шага зацепления у ведомого колеса (шаг зацепления ведомого колеса больше шага зацепления ведущего колеса) зубцы наклонены вправо (рис. 3, а), при отрицательной – влево (рис. 3, б).

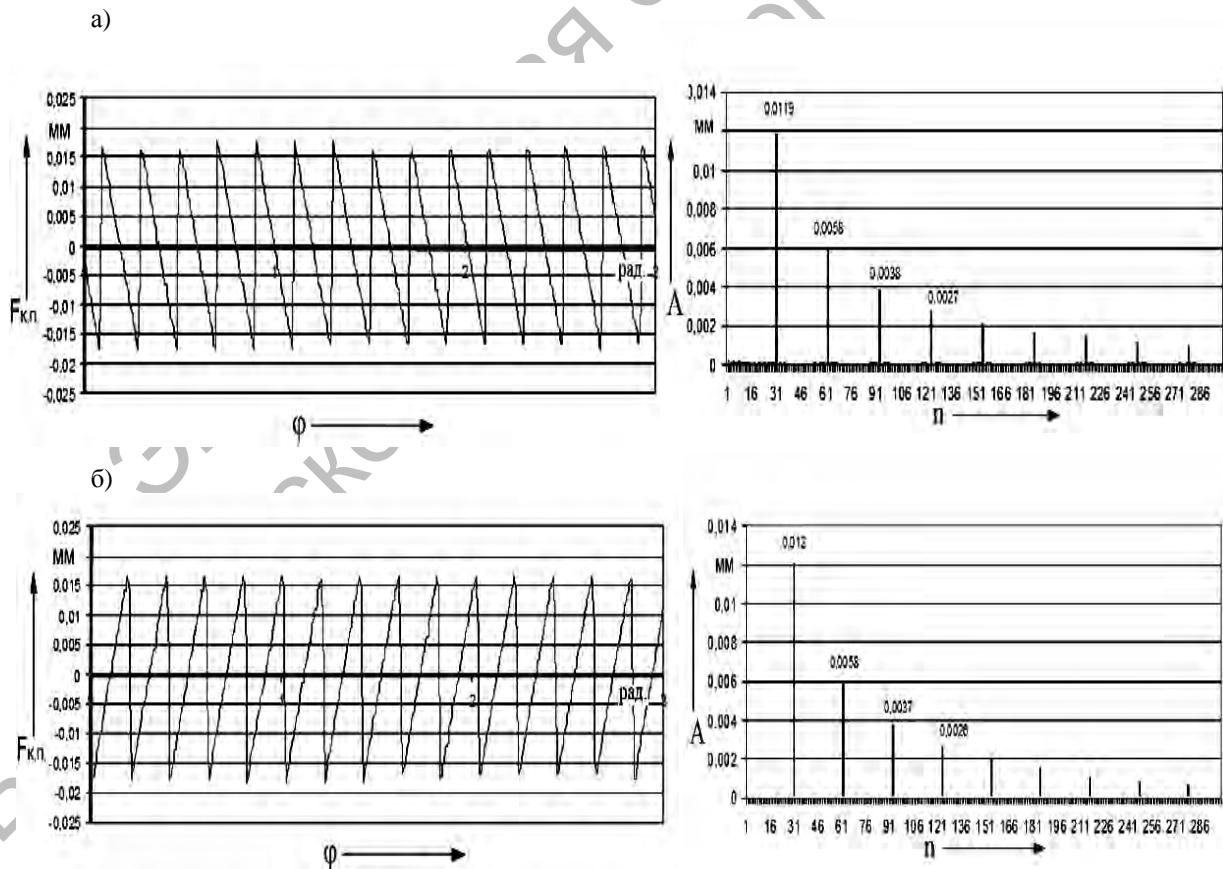


Рис. 3. График кинематической погрешности передачи при погрешности шага зацепления ведомого колеса

Погрешность шага зацепления отчетливо проявляется в спектре кинематической погрешности передачи в виде составляющих зубцовой частоты и кратных ей. Причем наибольшую величину имеет зубцовая составляющая, а кратные ей постепенно уменьшаются с увеличением кратности. При этом спектры кинематической погрешности передачи при отрицательной и положительной погрешностях шага зацепления колеса полностью идентичны и не дают дополнительной информации, позволяющей установить знак погрешности зацепления.

При детальном рассмотрении кривой кинематической погрешности видно, что график состоит из двух участков. Наклонный участок соответствует работе эвольвентных поверхностей, а крутой участок – работе при кромочном контакте (рис. 4).

При наличии положительной погрешности шага зацепления ведомого колеса в точках 1, 2 наблюдается эвольвент-

ное взаимодействие рабочих профилей зубьев (рис. 4, а). В точке 3 в зацепление входит следующая пара зубьев, сопровождаемая ударом кромки зуба ведомого колеса с ножкой зуба ведущего. При дальнейшем повороте зубчатых колес (точки 4, 5) происходит кромочное взаимодействие зубьев до тех пор, пока в работу не вступит эвольвентный участок профиля зуба ведомого колеса.

При отрицательной погрешности шага зацепления (рис. 4, б) на выходе из зацепления рабочих зубьев проявляется кромочное взаимодействие, т. е. вращение передается кромкой зуба ведущего колеса и ножкой зуба ведомого колеса. По мере дальнейшего поворота колес в точке 5 кромочное взаимодействие закончится, и в этот момент в зацепление вступит следующая пара зубьев, сопровождающаяся так называемым срединным ударом.

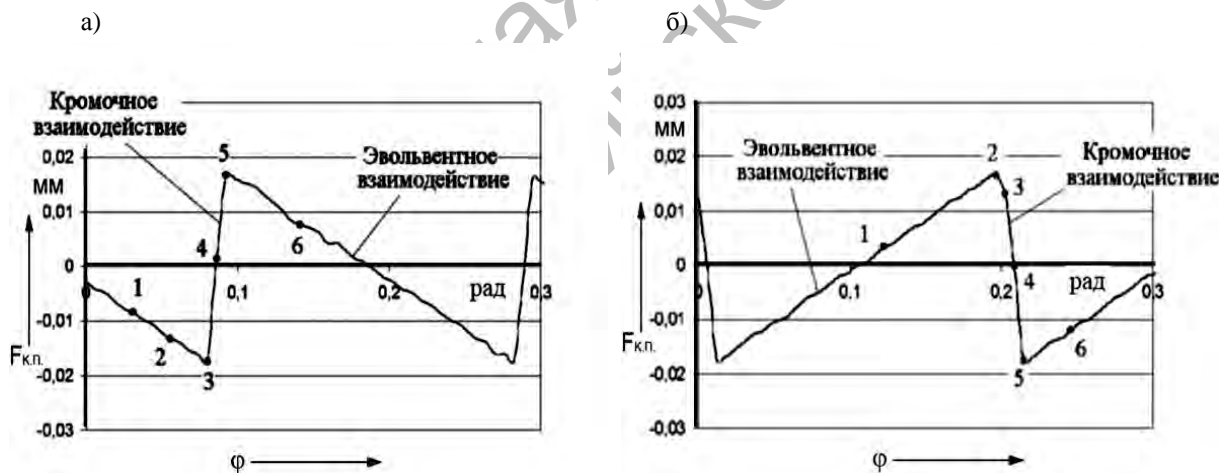


Рис. 4. Фрагмент зубцовой составляющей

Из анализа сигнала кинематической погрешности передачи и взаимодействия зубьев следует, что при отсутствии деформации в один и тот же момент в контакте участвует только одна пара зубьев, т. е. коэффициент перекрытия $\varepsilon = 1$ как при положительной, так и при отрицательной погрешности шага зацепления ве-

домого колеса. Очевидно, что при работе передачи под нагрузкой отрицательная погрешность шага зацепления (шаг зацепления ведущего колеса больше шага зацепления ведомого) будет компенсироваться в результате деформаций зубьев, а положительная погрешность (шаг зацепления ведущего колеса

меньше шага зацепления ведомого) будет увеличиваться.

Основной причиной ухудшения плавности работы передачи и уменьшения полноты контакта поверхностей сопряженных зубьев является погрешность бокового профиля зубьев. Наиболее важным и основным источником погрешности бо-

кового профиля являются погрешности червяка делительной цепи зубообрабатывающего станка и профиля делительного колеса, которые повторяются за каждый оборот этого колеса. Данная погрешность вызывает появление волнистости боковой поверхности нарезаемого зуба по профилю (рис. 5).

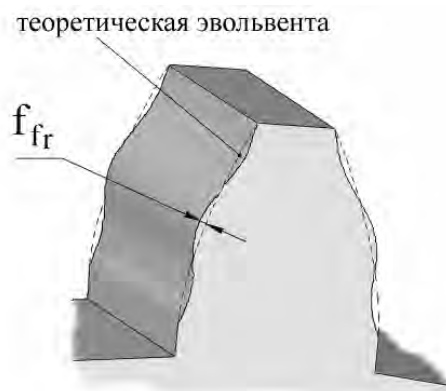


Рис. 5. Волнистость боковой поверхности зуба

Для установления влияния данного вида погрешности на вид кривой кинематической погрешности передачи и ее спектр была смоделирована работа зубчатого зацепления ($z_1 = 15$; $z_2 = 31$; $m = 4,5$ мм) при волнистости боковой поверхности ($f_{fr} = \pm 0,030$ мм) ведомого колеса с различным количеством волн q , укладываемых на боковой поверхности зубьев.

Как видно из графика кинематической погрешности и ее спектра (рис. 6), волнистость боковой поверхности профиля проявляется в виде значительного увеличения гармоник на зубцовой и кратных ей частотах. Так, на рис. 7 показаны амплитуды зубцовой и кратных ей (до шестой включительно) составляющих спектра. При количестве волн $q = 1$ и $q = 2$ наибольшее значение имеет первая гармоника зубцовой частоты, при $q = 3$ и $q = 4$ – вторая, а при $q = 5$ и $q = 6$ – третья. Величины максимальных амплитуд при количестве волн 1–4 приблизительно одинаковы, и отличаются не более чем на 2,5 мкм. Однако при $q = 5,6$ максимальная амплитуда, т. е. тре-

тья кратная зубцовой составляющая, значительно меньше наибольших составляющих при $q = 1..4$. Это объясняется тем, что при большом количестве волн контакт профилей зубьев будет происходить не в одной точке, а по нескольким точкам, лежащим на вершинах волн, что отражается в уменьшении амплитуд высокочастотных составляющих спектра. Следует отметить, что погрешность профиля с количеством волн $q > 4$ не так часто встречается на практике, т. к. при высокочастотных колебаниях звеньев цепи обката станка наблюдается срезание волн. Так, в момент образования впадин между гребнями волн инструмент снимает стружку и в тех местах профиля, где должны были образовываться гребни волн.

Рассмотренная погрешность профиля, выраженная в виде волнистости боковой поверхности, не является единственным возможным вариантом отклонения от теоретического профиля. Так, конечность режущих кромок, величины

осевой подачи, а также неравномерность окружного шага канавок фрезы или значительные сдвиги режущих кромок фрезы, возникающие в силу каких-либо погрешностей изготовления, приводят к нарезанию зубчатых колес, у которых боковая поверх-

ность всех зубьев состоит из нескольких плоскостей. Эти плоскости пересекаются между собой вдоль контактных линий колеса и образуют огранку поверхности зуба.

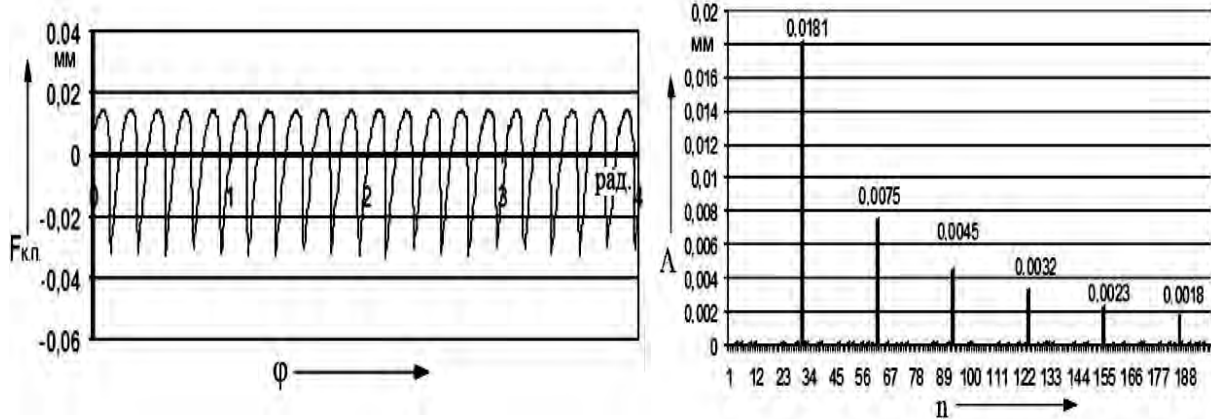


Рис. 6. Кинематическая погрешность и ее спектр при волнистости профиля ведомого колеса

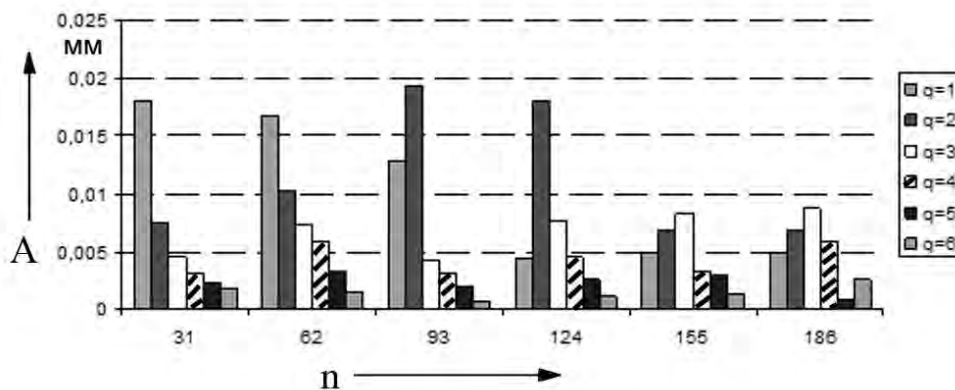


Рис. 7. Зубцовая и кратные ей составляющие спектра при волнистости боковой поверхности зубьев ($z_1 = 15$; $z_2 = 31$)

Огранка, как и волнистость боковой поверхности, четко проявляется на спектре кинематической погрешности в виде зубцовой и кратных ей составляющих. Однако на спектре кинематической погрешности не обнаруживается каких-либо особых признаков, позволяющих установить соответствие данному виду погрешности. Огранку с определенной долей допущения можно считать частным случаем волни-

стости, при которой количество волн соответствует числу ребер на боковой поверхности зубьев. Так, на рис. 8 показан зуб, у которого боковая поверхность состоит из пяти плоскостей, т. е. имеется четыре ребра на поверхности зуба. На рис. 9 показано сравнение фрагментов кривой кинематической погрешности при волнистости боковой поверхности с количеством волн $q = 4$ (пунктир-

ная линия) и кривой кинематической погрешности при огранке зуба с четырьмя ребрами на поверхности.

Рассмотренные выше погрешности процессов зубообработки носят систематический характер и проявляются на всех

зубьях. Однако в результате вибраций станка, вызванных как колебаниями сил резания, так и внешними воздействиями, могут возникнуть местные дефекты зубьев, носящие случайный характер.

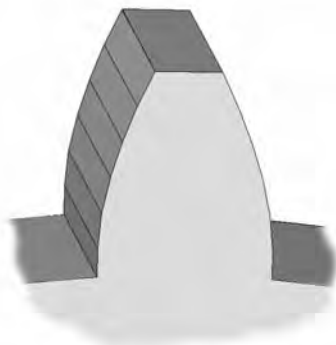


Рис. 8. Огранка боковой поверхности зубьев

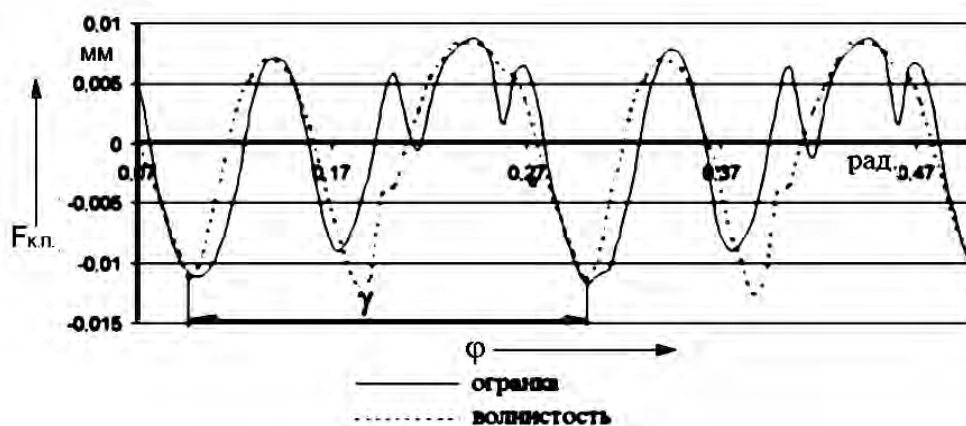


Рис. 9. Фрагменты кривых кинематической погрешности при волнистости ($f_{fr} = 0,010$ мм; $q = 4$) и огранке боковой поверхности зубьев

Также на искажение профиля зуба влияет состояние режущей кромки инструмента, т. е. его местные неровности. Особенностью погрешности данного вида является то, что она, как правило, проявляется на отдельных зубьях. На рис. 10 показан график кинематической погрешности передачи при геометрическом эксцентриситете ведомого колеса ($e = 0,050$ мм). На

боковой поверхности одного из зубьев ведомого колеса присутствует дефект. Как видно из графика, такой дефект, представляющий собой выступ на боковой поверхности одного из зубьев, четко отражается в сигнале кинематической погрешности в виде всплеска, проявляющегося один раз за оборот колеса. При этом всплеск направлен вверх.

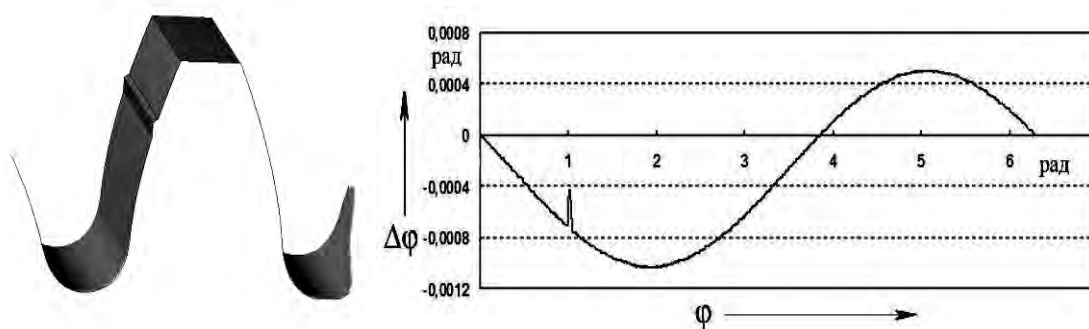


Рис. 10. Местный дефект в виде выступа на боковой поверхности зуба и проявление его на графике кинематической погрешности

Местный дефект в виде впадины на боковой поверхности (рис. 11), как и выступ, отражается в виде всплеска на графике кинематической погрешности, при этом всплеск направлен в обратную сторону. Однако величина этого всплеска намного меньше величины всплесков от выступов. Данное обстоятельство делает обнаружение таких местных дефектов воз-

можным только при детальном рассмотрении графика кинематической погрешности. К тому же наличие высокочастотных колебаний в сигнале кинематической погрешности, вызванных различными отклонениями профиля зубьев, делают обнаружение небольших всплесков практически невозможным.

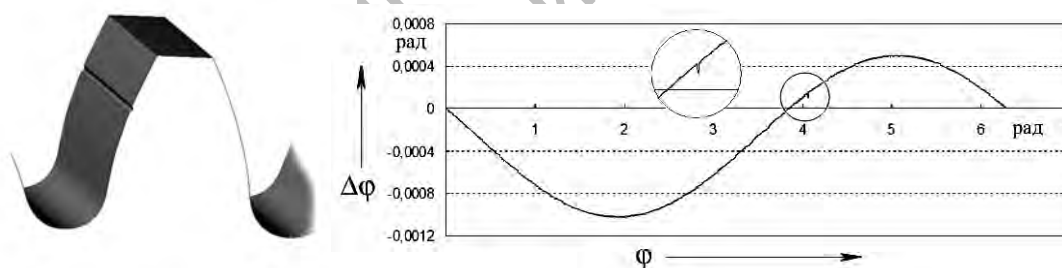


Рис. 11. Местный дефект в виде впадины на боковой поверхности зуба и проявление его на графике кинематической погрешности

В отличие от графика кинематической погрешности графики угловых скоростей и ускорений, полученные дифференцированием кинематической погрешности, позволяют более точно выявлять различные местные дефекты. Так, дефект в виде впадины, вызывающий незначительный всплеск на графике кинематической погрешности, четко отражается на

графике угловых скоростей (рис. 12). Данный факт может быть успешно использован для выявления по виду графиков кинематической погрешности, угловой скорости и ускорений различных местных дефектов, таких как забоины, сколы, трещины и др.

Для повышения износостойкости и долговечности зубчатых передач необ-

ходимо, чтобы полнота контакта сопряженных боковых поверхностей зубьев колес была наибольшей. При неполном и неравномерном прилегании зубьев уменьшается несущая площадь поверхности их контакта, неравномерно распределяются контактные напряжения и смазоч-

ные материалы, что приводит к интенсивному изнашиванию зубьев. Основными показателями, влияющими на условия контакта в передаче при сборке, являются отклонения от параллельности и перекос рабочих осей зубчатых колес.

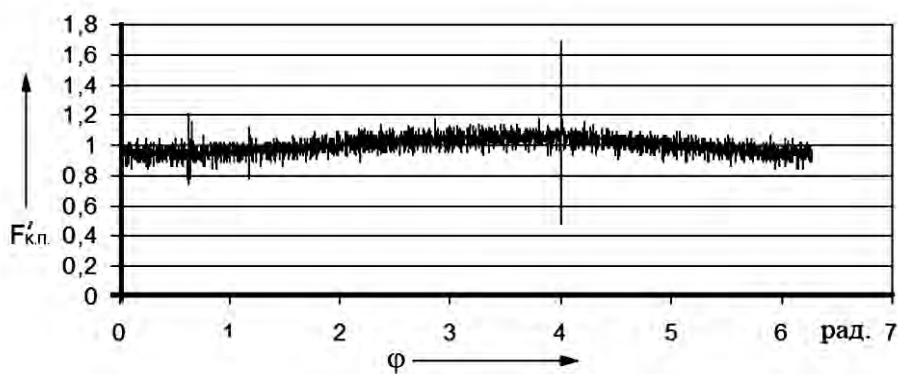


Рис. 12. Проявление местного дефекта на графике угловых скоростей

Для прямозубой зубчатой передачи с шириной венца $B = 26$ мм было смоделировано влияние отклонения от параллельности и перекоса рабочих осей колес на суммарное пятно контакта. На рис. 13, а показано суммарное пятно контакта передачи при отклонении от параллельности рабочих осей колес на $0,15$ град. При увеличении данной по-

грешности суммарное пятно контакта по длине зуба уменьшается (рис.13, б). Таким образом, даже при относительно небольших значениях данной погрешности контакт зубьев колес происходит по прямой (зуб одного колеса перекачивается кромкой по боковой поверхности зуба другого колеса).

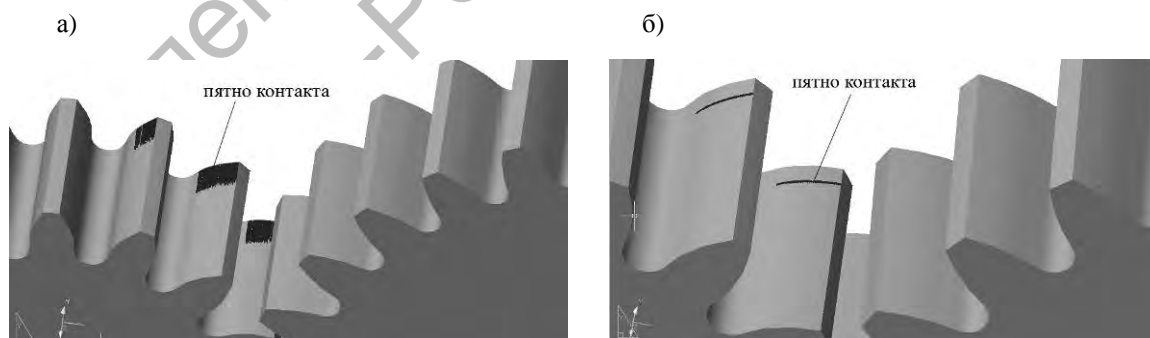


Рис. 13. Влияние отклонения от параллельности осей зубчатых колес на пятно контакта в передаче

На графике кинематической погрешности отчетливо проявляется циклическая составляющая на частоте, равной числу зубьев ведомого колеса. При

детальном рассмотрении формы зубцовой составляющей (рис. 14) видно, что она имеет пилообразный вид, с присутствием фазы эвольвентного и

кромочного контактов. Подобный вид кривой кинематической погрешности на-

блюдался при моделировании погрешности шага зацепления.

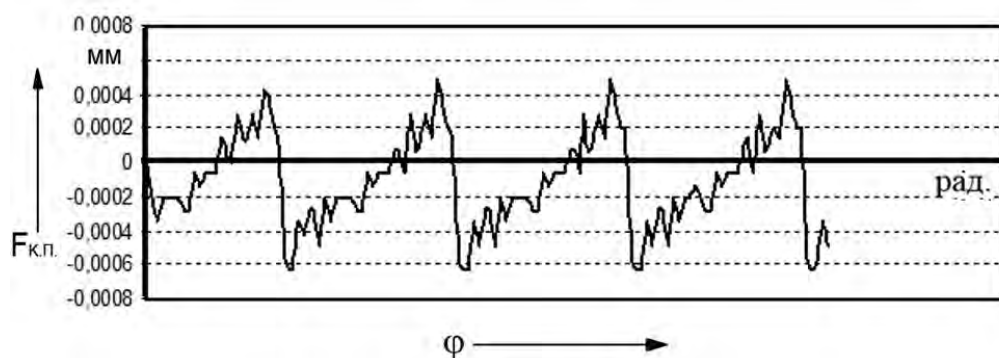


Рис. 14. Фрагмент зубцовой составляющей кривой кинематической погрешности при отклонении от параллельности рабочих осей колес на 2,0 град

Можно сделать вывод, что при наличии отклонения от параллельности рабочих осей происходит косвенное искажение эвольвенты зуба, приводящее к появлению погрешности шага зацепления передачи. Данное обстоятельство позволяет судить о возможности определения по результатам кинематического контроля передачи величины отклонения от парал-

лельности осей зубчатых колес, а также оценить ее влияние на пятно контакта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Забелин, Д. А. Исследование образования кинематических погрешностей зубчатых колес на основе 3D-моделирования / Д. А. Забелин // Вестн. МГТУ. – 2006. – № 1. – С. 73.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 06.11.2008

D. A. Zabelin **Influence of manufacturing errors and assembly of gear transmission on their kinematic accuracy**

Influence of the basic elementary errors of manufacturing and assembly of a gear transmission on their kinematic error is considered in the article. The research was carried out on the basis of the 3D-modelling, which allows including any errors of manufacturing and assembly in the model of a gear. Results of the research of influence of errors of tooth gearings on their kinematic accuracy, drive operation smoothness and tooth contact are given in the article.