

ПОВТОРНЫЙ КОНТАКТ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЧЕРВЯЧНОЙ ПЕРЕДАЧЕ

В.И. Парубец, к. т. н.

По мнению автора статьи, учет этого принципиально нового явления в работе червячных передач, найденного им еще в 1983 году, заставит заново переписать все учебники, диссертации, стандарты, методики расчетов, касающиеся теории зацепления червячных передач. Учет влияния повторного контакта в зацеплении этих передач, более полувека остававшегося незамеченным исследователями, позволит ответить на множество противоречивых вопросов о нагреве, долговечности, выборе исходных геометрических параметров червячных передач и др.

Но если это так, то у российских потребителей появится больше уверенности в возможностях нашей науки – движущей силы современного редукторостроения, и тем меньше останется сомнений в выборе редукторных фирм, к которым можно обратиться с разнообразными вопросами, касающимися разработки и изготовления современных, надежных и долговечных передач, редукторов и приводов.

Погрешности изготовления и монтажа червячной передачи вследствие их неопределенного характера приводят к случайному положению начального контакта в зацеплении, что влияет на работоспособность передачи; пятно начального контакта по ширине зуба колеса, оказывающееся в его зоне выхода или входа*, соответственно повышает или снижает работоспособность передачи. Такую закономерность обнаружили экспериментально и используют для повышения надежности червячной передачи путем преднамеренного искажения ее сопряженных поверхностей и локализации контакта в заданной зоне зуба [1–3]. Положительное влияние смещения начального контакта в зону выхода связывают, как правило, с улучшенными геометрическими показателями такого контакта [3], стимулирующими образование устойчивых масляных пленок. Однако если для средней зоны зуба и зоны выхода различия в геометрических показателях контакта действительно существенны, то зоны входа и выхода характеризуются примерно равными значениями этих показателей [2]. Таким образом, удовлетворительного объяснения наблюдаемого на практике эффекта пока нет.

В связи с изложенным рассмотрим вопрос о так называемом повторном контакте в цилиндрической червячной передаче, заключающемся в том, что одна и та же контактная точка поверхности Σ_1 витка червяка при разных его угловых положениях дважды вступает в контакт с поверхностью Σ_2 зуба червячного колеса. Эта особенность контакта хотя и описана в работе [4], однако раскрыта не полностью и для практических целей при проектировании и изготовлении червячных передач не используется.

* – Выход – участок боковой поверхности зуба, расположенный со стороны выхода витка червяка из зацепления; вход – со стороны входа червяка в зацепление.

Попытаемся на примере червячной передачи с эвольвентным червяком и прямым углом между ее осями пояснить природу повторного контакта. Для винтовой поверхности Σ_1 витка червяка уравнение вида

$$f(u, \vartheta, \varphi_1) = (u - h \vartheta \sin \gamma_B) \sin (\vartheta + \varphi_1) + r_B \cos \gamma_B \cos (\vartheta + \varphi_1) + r_w \cos \gamma_B = 0, \quad (1)$$

где u, ϑ – криволинейные координаты поверхности Σ_1 ; φ_1 – угол поворота червяка; h – винтовой параметр; γ_B – основной угол подъема линии витка червяка; r_B и r_w – радиус основного и начального цилиндров червяка, связывает значения переменных u, ϑ, φ_1 , удовлетворяющих условию контактирования поверхностей червячной передачи [5].

При $\varphi_1 = \text{const}$ уравнение (1) используют для определения точек на поверхности Σ_1 , контактирующих в данный момент, т. е. для определения мгновенных контактных линий. При фиксированных же значениях u и ϑ это уравнение дает ответ на вопрос об условиях контактирования любой точки поверхности Σ_1 во времени, т. е. при разных значениях φ_1 .

Действительно, решив уравнение (1) относительно φ_1 , получим

$$\varphi_1 = 2 \arctg \left[\frac{(u - h \vartheta \sin \gamma_B) \pm \sqrt{(u - h \vartheta \sin \gamma_B)^2 - (r_w^2 - r_B^2) \cos^2 \gamma_B}}{(r_B - r_w) \cos \gamma_B} \right] - \vartheta, \quad (2)$$

что позволяет выделить на поверхности Σ_1 три типа точек. Для удобства записи обозначим предварительно подкоренное выражение в формуле (2)

$$(u - h \vartheta \sin \gamma_B)^2 - (r_w^2 - r_B^2) \cos^2 \gamma_B = D.$$



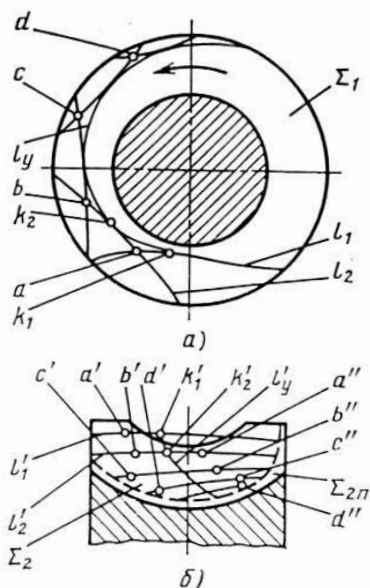


Рис. 1. Линии мгновенного контакта на поверхностях Σ_1 витка червяка и Σ_2 зуба колеса с точками первичного и повторного контактов; штриховая кривая – граница между активной Σ_2 и переходной $\Sigma_{2П}$ поверхностями зуба [2]

Точки первого типа, координаты u и ϑ которых удовлетворяют условию $D > 0$, в контакт с поверхностью Σ_2 зуба вступают дважды, при угловых положениях червяка, имеющих разность

$$\Delta\varphi_1 = 2 \arctg \left[\frac{\sqrt{(u - h \vartheta \sin \gamma_B)^2 - (r_w^2 - r_B^2) \cos^2 \gamma_B}}{r_w \cos \gamma_B} \right].$$

Заметим, что поскольку в реальной червячной передаче поверхность Σ_2 ограничена конструктивными размерами зуба колеса, часть точек на поверхности Σ_1 витка с координатами, удовлетворяющими условию $D > 0$, в контакт вступает лишь один раз, так как определяемые расчетом точки первичного контакта поверхности Σ_2 оказываются за пределами зуба (что будет показано ниже).

Точки второго типа, координаты u и ϑ которых удовлетворяют условию $D = 0$, в контакт с поверхностью Σ_2 вступают также лишь один раз. При этом данное условие есть не что иное как результат совместного решения уравнений

$$f(u, \vartheta, \varphi_1) = 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial f}{\partial \varphi_1} = 0,$$

описывающих линию l_y обыкновенных узловых точек контакта, огибающую мгновенные линии контакта на поверхности Σ_1 витка [5], и поэтому любая точка контакта на поверхности Σ_1 , удовлетворяющая данному условию, принадлежит линии l_y (рис. 1, а). Для точек на поверхности Σ_1 , по мере их приближения к линии l_y , разность $\Delta\varphi_1$ стремится к нулю, а точки первичного и повторного контакта приближаются к линии l'_y на зубе, сопряженной с линией l_y на витке червяка. Для точек самой линии l_y разность $\Delta\varphi_1 = 0$, а точки первичного и повторного контактов на поверхности Σ_2 сов-

падают и принадлежат линии l'_y . Следовательно, линия l'_y является границей, разделяющей зоны первичного и повторного контактов. Точки третьего типа, координаты u и ϑ которых удовлетворяют условию $D < 0$, в контакт с поверхностью Σ_2 не вступают; они находятся между линией l_y и основанием витка червяка.

Построения на рис. 1–5 иллюстрируют повторный контакт в червячной передаче с эвольвентным червяком, имеющей межосевое расстояние $a_w = 100$ мм, модуль $m = 5$ мм, коэффициент диаметра червяка $q = 9$, число витков червяка $z_1 = 4$, число зубьев колеса $z_2 = 31$, коэффициент смещения червяка $\chi = 0$. На рис. 6 показаны размеры и положения зоны повторного контакта на зубе колеса червячной передачи: $a_w = 100$ мм, $m = 5$ мм, $q = 9$ для различных сочетаний z_1, z_2 и χ .

На рис. 1, а точка a поверхности Σ_1 последовательно принадлежит двум мгновенным контактным линиям l_1 и l_2 , возникающим между поверхностями Σ_1 и Σ_2 передачи после поворота червяка на 45° ; следовательно, при $\Delta\varphi_1 = 45^\circ$ она дважды вступает в контакт с поверхностью Σ_2 зуба. С линией l_y линии l_1 и l_2 касаются в точках k_1 и k_2 . На поверхности Σ_2 зуба колеса (рис. 1, б) те же линии контакта, обозначенные l'_1 и l'_2 , пересекают линию l'_y в точках k'_1 и k'_2 . В момент зацепления, соответствующий линии контакта l_1 , точка a поверхности Σ_1 расположена слева от точки k_1 ; она контактирует с точкой a' поверхности Σ_2 , принадлежащей линии l'_1 и расположенной слева от точки k'_1 ; точка a' является точкой первичного контакта с точкой a поверхности Σ_1 . В момент зацепления, соответствующий линии l_2 , та же точка a поверхности Σ_1 расположена справа от точки k_2 ; она контактирует с точкой a'' поверхности Σ_2 , принадлежащей линии l'_2 и расположенной справа от точки k'_2 ; точка a'' яв-



Червячная пара

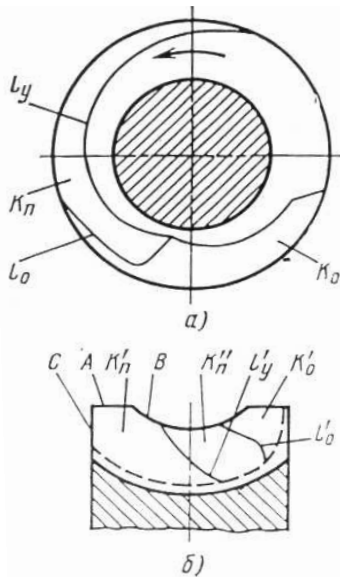


Рис. 2. Зоны зацепления поверхностей Σ_1 и Σ_2 червячной передачи, характеризующие их первичный, повторный и одинарный контакты:

а) зона K_n первичного и повторного контактов и зона K_o одинарного контакта на поверхности Σ_1 витка червяка;
 б) зоны первичного K'_n , повторного K''_n и одинарного K'_o контактов на поверхности Σ_2 зуба колеса

ляется точкой повторного контакта с точкой a поверхности Σ_1 . Точно так же точки b , c и d дважды вступают в контакт с поверхностью Σ_2 зуба в точках b' и b'' , c' и c'' , d' и d'' , причем точки b' , c' , d' являются точками первичного, а b'' , c'' , d'' – точками повторного контакта.

Совокупность множества положений мгновенных линий контакта и точек их пересечения на поверхности Σ_1 витка образует зону K_n (рис. 2, а), каждая точка которой, за исключением самой линии l_y , дважды вступает в контакт с поверхностью Σ_2 зуба: первый раз – с точкой, расположенной в зоне K'_n , второй – с точкой, расположенной в зоне K''_n (рис. 2, б). Границей, разделяющей зоны K'_n и K''_n на зубе, является линия l'_y . На поверхностях Σ_1 и Σ_2 существуют также зоны K_o и K'_o одинарного контакта; точки зоны K_o относятся к числу удовлетворяющих условию повторного контакта, который, однако, не возникает, как отмечено выше, из-за ограничений поверхности Σ_2 конструктивными размерами зуба, определяющими границу между зонами K''_n и K'_o : линия l'_o является совокупностью граничных точек повторного контакта, для которых точки первичного контакта расположены на кромках A , B и C зуба.

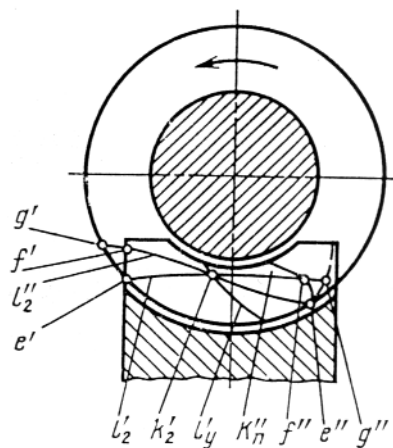


Рис. 3. Линии l'_1 и l''_2 , по которым точки линии l_2 (см. рис. 1, а) поверхности Σ_1 дважды контактируют с поверхностью Σ_2

Рассмотрение какой-либо мгновенной линии контакта между поверхностями Σ_1 и Σ_2 , например, линии l_2 , позволяет получить картину, показанную на рис. 3. Линия l''_2 на поверхности Σ_2 является совокупностью точек, которые, как и точки линии l'_2 мгновенного контакта, удовлетворяют условию контактирования с точками линии l_2 поверхности Σ_1 . Точки линии l_2 вступают в пределах отрезка $e'k'_2$ линии l'_2 в первичный мгновенный контакт с поверхностью Σ_2 ; повторно те же точки вступают в контакт с поверхностью Σ_2 на участке $e''k'_2$ линии l''_2 . В пределах отрезка k'_2f' линии l'_2 точки линии l_2 вступают в повторный мгновенный контакт с поверхностью Σ_2 ; этому контакту предшествует первичный контакт тех же точек с поверхностью Σ_2 на участке k'_2f' линии l''_2 . В пределах отрезка $f'g'$ линии l'_2 происходит одинарный контакт точек поверхностей Σ_1 и Σ_2 ; точки поверхности Σ_1 в пределах этого отрезка удовлетворяют условию повторного контакта с поверхностью Σ_2 , однако соответствующие первичному контакту точки, принадлежащие линии l''_2 , находятся на участке $f'g'$, т. е. вне пределов зуба.

Рассмотренная особенность контакта существенно влияет на свойства локальных зон зацепления поверхностей передачи, позволяет объяснить наблюдаемые в экспериментах различия в уровне ее эксплуатационных показателей при начальном контакте на входе и на выходе.

Смазочный материал в зону контакта червячной передачи традиционного исполнения, т. е. с червяком, расположенным под колесом в масляной ванне редуктора (рис. 4), вносится поверхностью Σ_1 витка червяка. При этом условия подвода смазочного материала в зоны первичного и повторного контактов и условия отвода тепла из этих зон существенно различны.

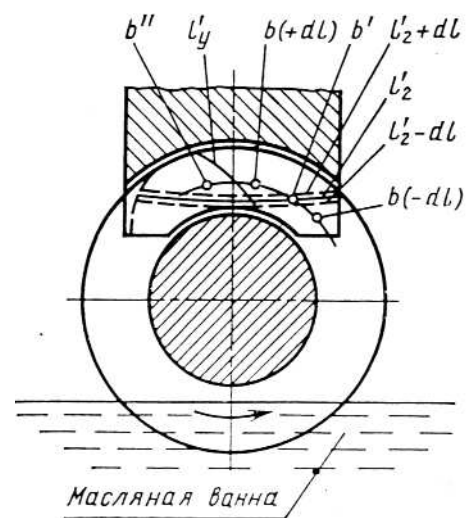


Рис. 4. Положение контактной точки b поверхности Σ_1 витка червяка относительно линии l'_2 мгновенного контакта и масляной ванны редуктора



На входе нормальная к контактной линии составляющая скорости движения контактной точки поверхности Σ_1 больше, чем скорость движения самой линии контакта по поверхности Σ_2 в том же направлении. Поэтому для некоторого момента зацепления, предшествующего, например, мгновенной линии контакта l'_2 , контактная точка b , обозначенная на рис. 4 как $b(-dl)$, находится перед линией l'_2-dl , в зоне избыточного давления смазочного материала, нагнетаемого вращающимся червяком в сужающийся между поверхностями Σ_1 и Σ_2 зазор. В последующий за линией l'_2 момент зацепления точка b , обозначенная как $b(+dl)$, находится за линией l'_2+dl , в зоне недостаточного давления смазочного материала, так как линия l'_2+dl является естественной преградой для ее проникновения к точке b . Поэтому повторное вступление в контакт любой точки происходит при ухудшившихся условиях смазывания.

Условия смазывания при повторном контакте ухудшаются также вследствие неравных возможностей в отношении отвода тепла. Если некоторый локальный участок зоны K_n на поверхности витка вступает в первичный контакт относительно охлажденным, поскольку перед этим он находился в масляной ванне редуктора, то за время поворота червяка на угол $\Delta\phi_1$, когда возможности отвода тепла в окружающую среду редуктора ограничены, он не успевает охладиться и в повторный контакт вступает с повышенной локальной температурой, что не может не сказаться на условиях образования масляных пленок и несущей способности в зоне повторного контакта. Это особенно важно для начального периода эксплуатации червячной передачи, когда происходит формирование контактного состояния ее поверхностей после механической обработки [1]. В передаче с начальным контактом, расположенным на входе, в зоне K'_n , и расширяющимся на выходе, в зоне K''_n , возможности удовлетворительного формирования поверхности зуба в зоне K''_n ограничены из-за ухудшенных условий поступления смазочного материала и повышенной локальной температуры точек поверхности Σ_1 , повторно вступающих в контакт. Это и является одной из причин рисков, задиров и других нежелательных явлений [1, 3], снижающих эксплуатационные показатели передачи.

Качественно иные явления имеют место в червячной передаче с начальным контактом на выходе и расширяющимся по направлению входа. Если начальный контакт передачи сконцентрирован в зонах K''_n, K'_o , то зацепление происходит в условиях одинарного контакта, и зона K''_n формируется при обильном подводе смазочного материала и улучшенных возможностях отвода тепла. В зоне расширяющегося контакта протекают процессы, подобные шевингованию или полированию поверхностей передачи [1]. Расширение контакта на

входе, за линией l'_y (рис. 2, б), и формирование зоны K'_n также происходят в условиях благоприятного первичного контакта, а отрицательное влияние появляющегося в зоне K''_n повторного контакта в этом случае ослабевает, так как зона K''_n ранее уже сформирована в условиях одинарного контакта.

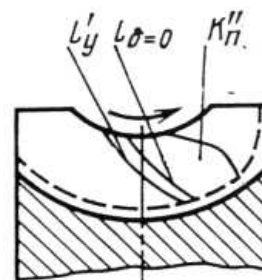


Рис. 5. Положение линии $l_{\delta=0}$ на поверхности Σ_2 зуба колеса, в точках которой вектор скорости скольжения касателен к мгновенной линии контакта

Отдельно необходимо сказать о наличии в зоне K''_n поверхности Σ_2 линии $l_{\delta=0}$, в точках которой угол δ между вектором скорости скольжения витка червяка и зуба колеса и касательной к линии контакта равен нулю (рис. 5). Отрицательное влияние участка поверхности Σ_2 в окрестности линии $l_{\delta=0}$ и плохих условий смазки, приводящих к возникновению рисков, задиров и т. д., хорошо известно [3]. Однако условия подвода смазочного материала в окрестность линии $l_{\delta=0}$, а вместе с тем и возможность формирования этого участка поверхности Σ_2 зуба, предупреждения появления рисков, задиров будут также различными. В частности, в передаче с контактом, расширяющимся с выхода на вход, формирование этого участка поверхности Σ_2 происходит при обильном подводе смазочного материала, и отрицательное влияние этой зоны зацепления будет слабее.

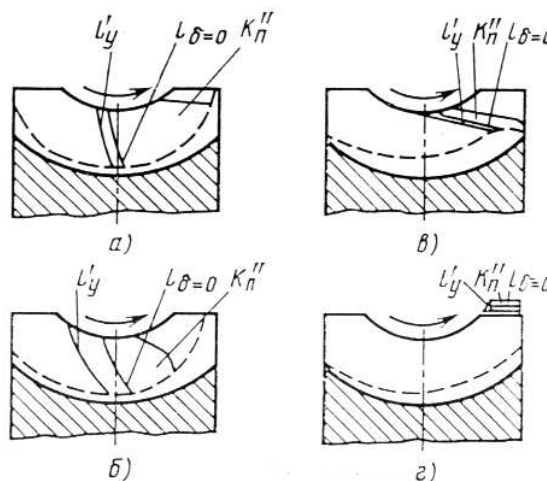


Рис. 6. Зависимость размеров и положения зоны K''_n повторного контакта на зубе колеса червячной передачи ($a_w=100$ мм, $m=5$ мм, $q=9$) при различных значениях числа витков z_1 , числа зубьев z_2 и коэффициента смещения χ :
 а) $z_1=1, z_2=29, \chi=1$;
 б) $z_1=4, z_2=29, \chi=1$;
 в) $z_1=4, z_2=33, \chi=-1$;
 г) $z_1=4, z_2=35, \chi=-2$



Сложилось представление об ограниченных возможностях ортогональных червячных передач в связи с существованием огибающей l_y мгновенных контактных линий на поверхности Σ_1 [5,6], и единственной мерой улучшения свойств контакта, исключающей либо смещающей за пределы зуба линию l'_y в червячной передаче, считают переход к непрямому углу между ее осями.

Между тем, для ортогональных червячных передач, имеющих преимущественно практическое применение, существует по крайней мере два эффективных пути улучшения свойств контакта, полностью исключающих из зацепления линию l'_y и, следовательно, повторный контакт.

Первый из них основан на использовании зависимости размеров и положения зоны повторного контакта K''_n от исходных геометрических параметров передачи. Зона K''_n , как показано на рис. 6, а, б, сокращается с увеличением z_1 и смещается в среднюю часть зуба, а с уменьшением χ также сокращается, но смещается на выход (рис. 6, в, г). Вместе с зоной K''_n на выход смещается и линия $l_{\delta=0}$. При $\chi < -1$ сдвиг зоны K''_n на выход и к вершине зуба усиливается, и она оказывается за пределами зуба (рис. 6, г). Такая возможность, в частности, реализована в червячных передачах с $\chi \approx -2$ [7] и успешно используется рядом зарубежных фирм для улучшения эксплуатационных свойств червячных редукторов [8]. Заметим, что для передачи со смещенной за пределы зуба зоной K''_n назначение $\chi < -1$ следует согласовывать с выбором угла профиля α_n витка червяка. За рубежом, например, применяют $\alpha_n = 14,5; 20; 25$ и $\alpha_n = 30^\circ$ [7], при этом большие значения α_n соответствуют повышенной заходности витков червяка. В показанном на рис. 6, г примере смещение зоны K''_n за пределы зуба достигнуто при $\chi = -2$ и $\alpha_n = 32^\circ$.

Другим направлением является поиск такого сочетания исходных геометрических параметров передачи, при котором условие $\partial f / \partial \phi_1 = 0$ существования точек линии l_y на поверхности червяка [5] не будет выполняться. Это будет означать отсутствие повторного контакта в червячной передаче. В частности, для ортогональной червячной передачи с эвольвентным червяком условие $\partial f / \partial \phi_1 = 0$ приводится к виду

$$r_B = -r_w \cos(\vartheta + \phi_1). \quad (3)$$

При $r_B > r_w$ условие (3) теряет смысл, так как $\cos(\vartheta + \phi_1)$ не может быть меньше минус 1, что указывает на отсутствие линии l_y и, соответственно, повторного контакта. Для других видов червячных передач тот же результат будет получен, если использовать ярко выраженный выпуклый профиль в осевом или нормальном сечении витка. Предположительная оптимальная область параметров таких передач определяется значениями $-2 \leq \chi \leq -1$ и $z_1 \geq 2$.

ВЫВОДЫ

1. Повышение эксплуатационных показателей цилиндрических червячных передач с начальным контактом на выходе достигается исключением отрицательного влияния повторного контакта на этапе формирования контактного состояния их поверхностей.

2. Для обоснованного выбора положения пятна начального контакта в червячной передаче его необходимо согласовывать с положением зон первичного и повторного контактов на зубе колеса. Как правило, начальный контакт на зубе должен быть расположен в зоне выхода витка червяка из зацепления, причем в передачах с положительным коэффициентом смещения червяка, преимущественно многозаходных, начальный контакт можно сдвигать в среднюю зону зуба больше, чем в передачах с отрицательным коэффициентом смещения. В многозаходной червячной передаче с отрицательным коэффициентом смещения червяка и зоной повторного контакта на выходе и у вершины зуба лучшим решением будет положение начального контакта в средней зоне зуба.

3. В ортогональной червячной передаче возможно улучшение свойств контакта либо смещением линии обыкновенных узловых точек и повторного контакта за пределы зуба, либо их полным исключением из зацепления. Вопрос о выборе исходных геометрических параметров ортогональных червячных передач с улучшенными свойствами контакта требует дополнительных исследований.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Зак П.С., Соркин Г.И. О начальном контакте в червячных передачах. М.: НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1967, 18–67–62, 8 с.
2. Парубец В.И. О выборе зон силовой локализации в червячных передачах. Вестник машиностроения, 1982, № 9, с. 9–14.
3. Часовников Л.Д. Передачи зацеплением. М.: Машиностроение, 1969, 487 с.
4. Takao Sakai, Minoru Maki. An Investigation on Secondary Action on skeww Gears. «Bull. JSME», 1973, 16, № 93 (ASME Сер. В. Конструирование и технология машиностроения, 1974, т. 96, № 3, с. 305–313).
5. Литвин Ф.Л., Бернацкий И.П. Определение и исключение неблагоприятных зон зацепления в цилиндрических червячных передачах. – Вестник машиностроения, 1976, № 12, с. 14–16.
6. Бернацкий И.П., Рыбаков В.И. Определение обыкновенных узловых точек контакта в цилиндрической червячной передаче. Механика машин. Вып. 31–32, М.: Наука, 1972, с. 88–92.
7. Buckingham E., Ryffel H. Design of Worm and Spiral Gears. The Industrial Press. New York, 1960.
8. Corfield J. Die Holroyd – Zahnform für Schneckengetriebe. «asr. diq. anqew Antriebstechnik». Heft 11/12, Nov/Dez. 1975.
9. Wozniak K. J. Worm Gears of Increased seizure and Pitting resistance. Proc. 5th world Congr. Theor. Mach. and Mech., Montreal, 1979, vol. 2, p. 1113–1115.

