

УДК 530.1:833.06

**СИНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭВОЛЮЦИИ МНОЖЕСТВА СПОСОБОВ
НАРЕЗАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС**

канд. техн. наук, проф. А.И. ГОЛЕМБИЕВСКИЙ
(Полоцкий государственный университет)

С позиций общей теории систем описываются пионерные способы (*S*-системы) нарезания цилиндрических зубчатых колес. В этой группе способов формообразующей обработки воспроизведение профиля зубьев осуществляется посредством копирования и обката, а линии зуба по длине – посредством строгания (долбления), фрезерования и точения. На основе системного описания пионерных способов предлагается синергетическая модель эволюции открытого множества способов механической обработки резанием цилиндрических зубчатых колес.

Введение. Открытое множество способов формообразующей обработки (*S*-систем) нарезания цилиндрических зубчатых колес характеризуется использованием одного вида энергетического воздействия на твердое тело. При механическом резании функцию энергетической подсистемы выполняет кинематическая подсистема. Поэтому для всех способов названного множества критерий сложности энергетической подсистемы равен нулю. При качественно различной длине ступицы нарезаемого колеса возможны две схемы базирования. Поэтому для каждого способа рассматриваемого множества возможны два варианта базирования нарезаемого колеса, т.е. два варианта базирующей подсистемы. Конечное множество отношений между базами и характеристическим образом инструмента для обоих вариантов базирования равно нулю. Следовательно, критерий сложности базирующей подсистемы для всех способов данного множества равен трем. Тогда общий критерий способов обработки, составляющих рассматриваемое множество, равен сумме критериев сложности кинематической и базирующей подсистем [1, 2].

Модель эволюции множества способов нарезания цилиндрических зубчатых колес. Используя описание пионерных способов обработки резанием цилиндрических прямозубых колес (табл. 1 и 2), оказавшихся у истоков открытого множества способов механической зубообработки, рассмотрим с позиций синергетики эволюцию (целенаправленное развитие) данного множества.

Таблица 1

Пионерные способы формообразующей обработки резанием цилиндрических прямозубых колес при профилировании копированием

№ схемы	Схема способа формообразующей обработки зубчатой поверхности	Математическая модель способа
1		$P = \{E\}_1, E - H^C$ $^1S = \{^K M \cap ^B M, M^B\}$ $^K M = (J \cup E)_H \cup (J \cup E)_{Bp} \cup (J \cup E)_D$ $^K F = \{H^C, \Phi_H(\downarrow \Pi_1), Bp(\downarrow \Pi_2), D(\downarrow B_3)\}$ $^B M = \cup^i M_i, \text{ где } i = 3$ $C_S = C_K + C_B = 6 + 3 = 9$
2		$P = \{E\}_K, E - \Pi$ $^1S = \{^K M \cap ^B M, M^B\}$ $^K M = \{(J \cup E) \wedge (J \cup E)\}_H \cup (J \cup E)_D$ $^K F = \{\Pi, \Phi_H(B_1) \wedge (\downarrow \Pi_2), D(\downarrow B_3)\}$ $^B M = \cup^i M_i, \text{ где } i = 3$ $C_S = C_K + C_B = 6 + 3 = 9$
<p><i>P</i> – характеристический образ инструмента; <i>E</i> – H^C – класс образования поверхности; 1S – модель способа обработки; $^K M$, $^K F$ – структура и функция кинематической подсистемы; $^B M$ – структура базирующей подсистемы; C_S – критерий сложности способа.</p>		

Таблица 2

Пионерные способы формообразующей обработки резанием цилиндрических прямозубчатых колес при профилировании обкатом

№ схемы	Схема способа формообразующей обработки зубчатой поверхности	Математическая модель способа
1		$P = \{M\mathcal{E}\}_K, H^K - \Pi$ ${}^1S = \{{}^K M \cap \mathcal{E}M, M^B\}$ ${}^K M = \{(J \cup E)_O \cup \{(J \cup E) \wedge (J \cup E)\}_H\}$ ${}^K F = \{H^K - \Pi, \Phi_O(B_1 B_2), \Phi_H(B_1 \wedge \Pi_3)\},$ ${}^B M = U^B M_i, \text{ где } i = 3$ $C_S = C_K + C_B = 7 + 3 = 10$
2		$P = \{M\mathcal{E}\}_K, H^C - H^K$ ${}^1S = \{{}^K M \cap \mathcal{E}M, M^B\}$ ${}^K M = (J \cup E)_O \cup (J \cup E)_H \cup (J \cup E)_{Bp} \cup (J \cup E)_{Bc}$ ${}^K F = \{H^C - H^K, \Phi_O(\downarrow \Pi_1), \Phi_H(B_2 B_3), Bp(\Pi_4), /Bc(\downarrow \Pi_5)\}$ ${}^B M = U^B M_i, \text{ где } i = 3$ $C_S = C_K + C_B = 9 + 3 = 12$
3		$P = \{M\mathcal{E}\}_K, H^K - H^C$ ${}^1S = \{{}^K M \cap \mathcal{E}M, M^B\}$ ${}^K M = (J \cup E)_O \cup (J \cup E)_H$ ${}^K F = \{H^K - H^C, \Phi_O(B_1 B_2), \Phi_H(\Pi_3)\}$ ${}^B M = U^B M_i, \text{ где } i = 3$ $C_S = C_K + C_B = 5 + 3 = 8$

Примечание. Экспликация математической модели способа представлена в таблице 1.

Английский механик Г. Мондсли в 1800 году, организовав свое дело и получив патент на токарно-винторезный станок с двухколесной гитарой сменных зубчатых колес, приступил к производству металлорежущих станков на промышленной основе. Этот год считается годом рождения станкостроения как специализированной отрасли производства. Г. Мондсли выпускал различные станки, в том числе зубострогальные и ряд модификаций фрезерных станков. Из этого можно сделать вывод о том, что способ строгания прямозубчатых цилиндрических колес фасонным резцом и, вероятно, с некоторым сдвигом во времени – способ фрезерования таких же колес фасонной фрезой, предшественницей современной модульной фрезы, были известны (рис. 1, точки бифуркации A и B поля ветвящихся виртуальных путей эволюции, рассматриваемого множества).

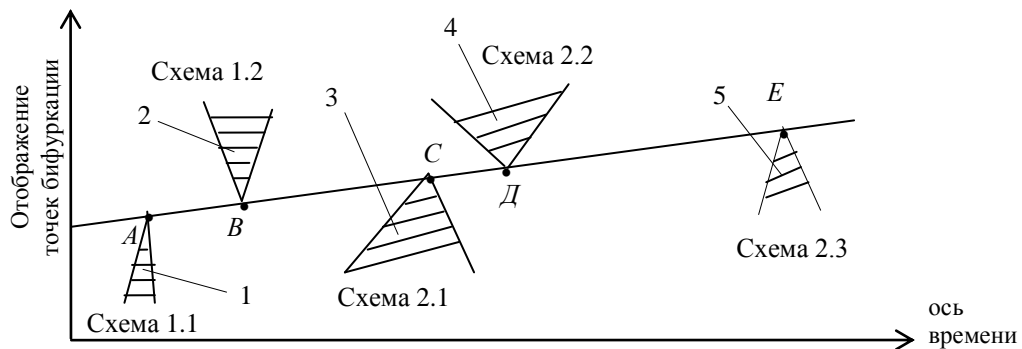


Рис. 1. Поле ветвящихся виртуальных путей эволюции открытого множества способов нарезания цилиндрических зубчатых колес

Оба способа зубообработки были созданы на основе интуиции и предшествующего опыта конструирования и изготовления соответствующих станков как нестандартного оборудования. В точках бифуркации *A* и *B*, как правило, образуются траектории или достаточно узкие коридоры *1* и *2* траекторий эволюции соответственно подмножества способов строгания зубчатых колес фасонным резцом и способов фрезерования таких же колес фасонной фрезой. В синергетике коридор эволюции принято называть аттрактором [3].

При зубострогании (см. табл. 1, схема 1) линия зуба воспроизводится в виде следа фасонного резца при его поступательно-возвратном движении $\uparrow\Pi_1$. Причем одна половина этого движения является движением резания, а другая – движением деления, переносящим траекторию движения резания, являющегося формообразующим, в исходное положение для его повторения. Каждому поступательно-возвратному движению резца предшествует движение врезания Π_2 на часть припуска, соответствующего высоте зуба (глубине впадины). Последовательная обработка всех зубьев (впадин) обеспечивается периодическим движением деления B_3 , выполняемым после обработки каждого предшествующего зуба (впадины). Отсюда следует, что пионерный способ фасонного зубострогания характеризуется низкой производительностью, так как более половины машинного времени обработки приходится на вспомогательные движения: деление по линии зуба, деление по профилю зуба и врезание. Тем не менее этот способ используется в настоящие время в тяжелых зубострогальных станках, например, в частной структуре станка модели SH-600/735E фирмы Магг (Швейцария).

На основе пионерного способа фасонного зубострогания в XX столетии было изобретено еще два способа. В начале столетия предложен способ строгания одновременно двух зубьев (впадин) конического прямозубого колеса двумя фасонными резцами, воспроизводящими линию зуба в противофазе. Цель такого технического решения – повышение производительности обработки за счет сокращения в два раза времени деления по профилю зуба. Данный производный способ в настоящее время используется в частной структуре зубострогальных станков, например, моделей 523 и 526 и их последующих модификаций, выпускаемых в России. В середине XX столетия предложен способ контурного строгания (долбления) цилиндрических прямозубых колес, приведенный на рисунке 2.

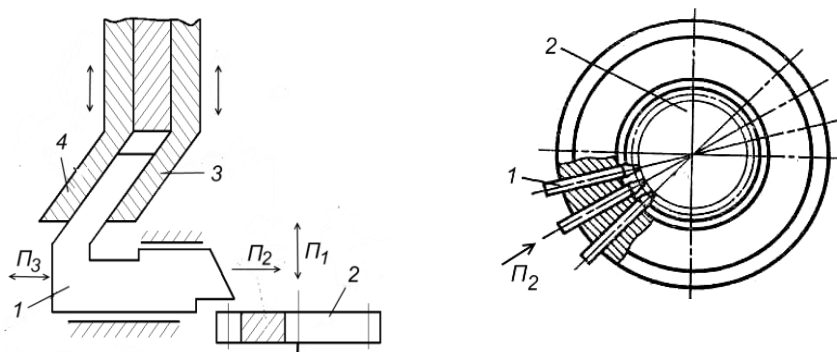


Рис. 2. Способ контурного долбления цилиндрического прямозубого колеса

Цель такого технического решения – существенное повышение производительности обработки за счет одновременного строгания всех впадин колеса. По этому способу количество фасонных резцов равно числу впадин нарезаемого колеса. Резцы *1* собраны в контурную долбежную головку. При строгании образующая – линия профиля всех впадин – воспроизводится зеркальным отображением профиля резцов, т.е. множеством их характеристических образов, а направляющая – линия зуба по длине – поступательно-возвратным движением $\uparrow\Pi_1$ заготовки *2*. При строгании резцы *1* получают прерывистую подачу радиального врезания Π_2 и движение «отскока» $\uparrow\Pi_3$ для устранения затирания резцов о заготовку при ее обратном ходе в движении резания $\uparrow\Pi_1$. Движения Π_2 и $\uparrow\Pi_3$ резцов осуществляются посредством сообщения втулкам *3* и *4* поступательно-возвратных движений. Срезание припуска одновременно по всем впадинам зубьев производится последовательными слоями. Для удобства отсчета величины врезания (параметр настройки – путь) угол конуса втулок *4* и *5* инструментальной головки равен $34^{\circ}16'$, что обеспечивает при перемещении втулки *4* на 1 мм перемещение резцов *1* на 0,5 мм на один двойной ход заготовки *2* в движении Π_1 .

Математическая модель способа контурного зубодолбления и его функция имеют вид:

$$P = \{E\}_K, E - H^C, \text{ где } K - \text{ количество резцов контурной головки; } {}^1S = \{ {}^K M \cap {}^3 M, M^B \};$$

$${}^K M = (J U E)_H \cup (J U E)_{Bp} \cup (J U E)_{Bc}; {}^K F = \{ H^C, \Phi_H(\uparrow\Pi_1), Bp(\Pi_2), Bc(\Pi_3) \};$$

$${}^B M = U^B M_i, \text{ где } i = 3; C_S = C_K + C_B = 6 + 3 = 9.$$

По производительности контурное зубодолбление превосходит зубофрезерование червячными фрезами и зубодолбление зуборезными долбляками. Например, при нарезании колеса, имеющего $z = 40$, $m = 4$, $b = 30$ мм, на станке модели 5110 или 5120 время обработки равно 1 мин. Но для нарезания зубчатых колес с другим числом зубьев или другим модулем необходимо иметь другую резцовую головку. Отсюда следует, что данный способ не универсален. Контурная резцовая головка, по сравнению с червячными фрезами и зуборезными долбляками, значительно сложнее, дороже и менее технологична. Это существенно ограничивает использование данного способа нарезания зубчатых колес. По существу аттрактор I в точке бифуркации A эволюции (см. рис. 1) подмножества способов фасонного строгания ограничен приведенными примерами.

Низкая производительность пионерного способа фасонного зубострогания привела к изобретению пионерного способа фасонного зубофрезерования (см. табл. 1, схема 2). По этому способу линия зуба – направляющая – воспроизводится составным движением касания $\Phi_H(B_1) \wedge (\uparrow P_2)$, состоящим из двух элементарных движений: вращения B_1 фасонной фрезы I и поступательного перемещения P_2 заготовки 2 в направлении, параллельном линии зуба. Последовательная обработка всех зубьев (впадин) обеспечивается периодическим движением деления B_3 , аналогичным такому же движению при фасонном зубострогании. При фасонном зубофрезеровании отпадает необходимость в движении врезания. Возрастает также период размерной стойкости инструмента. В итоге возрастает производительность зубообработки. На основе рассматриваемого пионерного способа предложены также способ нарезания косозубых колес и способ нарезания прямозубых конических колес. В настоящее время пионерный способ фасонного зубофрезерования и производные от него способы, используются преимущественно на универсальных вертикальных и горизонтальных фрезерных станках, оснащаемых универсальными делительными головками, в ремонтном и единичном производстве. Эти способы реализуются также на станках инструментального производства, например, на специальном станке модели 6793У для одновременной прорезки винтовых канавок и снятия затылка режущей кромки у сверл в крупносерийном и массовом производстве.

Недостатки пионерного способа фасонного зубофрезерования – недостаточная для современного производства производительность и потребность в большом количестве фрез одинакового модуля из-за изменения кривизны профиля зубьев при нарезании колес с различным числом зубьев. Частично второй недостаток компенсируется посредством использования различных комплектов модульных фрез. Для каждого модуля эти комплекты насчитывают 8, 15 и 26 фрез.

Развитие теории зубчатых зацеплений стало объективной предпосылкой изобретения пионерных способов нарезания зубчатых колес при их профилировании обкатом, обеспечивших революционные преобразования в области формообразующей обработки цилиндрических зубчатых колес. Фирма «Пфаутер» (Германия) в 1895 году выпустила первый зубофрезерный станок для нарезания цилиндрических прямозубых колес червячной фрезой (см. табл. 2, схема 1) по патенту 1876 года. Таким образом, на основе научного подхода были изобретены способ обкатного зубофрезерования зубчатых колес (см. рис. 1, точка бифуркации C), червячная фреза и соответствующий зубообрабатывающий станок. В основу воспроизведения профиля зубьев цилиндрического колеса по пионерному способу обкатного зубофрезерования положена схема зацепления червяк – червячное колесо. При зубофрезеровании прямозубого колеса воспроизведение профиля (образующая) осуществляется сложным движением обката $\Phi_O(B_1B_2)$, а линии зуба (направляющая) – составным движением касания $\Phi_H(B_1 \wedge P_3)$. Этот способ превосходит способ фасонного фрезерования по производительности, универсальности и качеству зубообработки. Его аттрактор 3 в точке бифуркации C содержит значительный массив траекторий эволюции множества способов зубофрезерования косозубых и червячных колес, шлицевых валов, колес с наклонными по делительной окружности зубьями, конических колес с дуговыми зубьями конической червячной фрезой и т.д. Названные производные способы предложены на основе использования принципа изменения (усложнения) структуры пионерного способа зубофрезерования, изменения последовательности и правил выполнения отдельных приемов. На различных этапах эволюции обкатного зубофрезерования их мировая новизна, изобретательский уровень и возможность применения в зубообрабатывающих станках подтверждалась соответствующими патентами и авторскими свидетельствами.

Основной недостаток зубофрезерования червячными фрезами – невозможность нарезания меньшего колеса в блоке, зубчатого колеса внутреннего зацепления и нецелесообразность нарезания зубчатых секторов. Вероятно, именно эти обстоятельства привели к изобретению пионерного способа обкатного зубодолбления (см. табл. 2, схема 2). Этот способ был реализован в кинематической структуре зубодолбежных станков, к выпуску которых приступила в 1905 году фирма «Феллоу» (США).

По пионерному способу обкатного зубодолбления (строгания) линия зуба (образующая) воспроизводится простым движением $\Phi_O(\uparrow P_1)$, а профиль зубьев (направляющая) – движением обката $\Phi_H(B_2B_3)$, воспроизводящим зацепление пары зубчатых колес: зуборезного долбяка 1 и нарезаемой заготовки 2 . Его аттрактор 4 в точке бифуркации D содержит также значительный массив траекторий эволюции способов обкатного зубодолбления прямозубых и косозубых колес, зубчатых венцов колес внутреннего зацепле-

ния, зубчатых реек и секторов, колес с наклонными по делительной окружности зубьями. Характерной особенностью данного массива являются траектории, основанные на изменении структуры, последовательности приемов и правил выполнения приемов как пионерного, так и производных от него способов.

Как показывает анализ патентных источников и проспектов станкостроительных фирм, выпускающих зубообрабатывающие станки, наиболее интенсивно эволюционируют множества способов зубофрезерования червячными фрезами и зубодолбления зуборезными долбьяками. Виртуальная техническая идея профилирования зубьев колес посредством обката, используемая в пионерных и производных от них способах зубофрезерования и зубодолбления цилиндрических колес, со временем стала широко использоваться при разработке способов строгания конических прямозубых колес резцами, фрезерования конических зубчатых колес с круговыми (дугowymi) зубьями резцовыми головками, долбления зуборезными гребенками цилиндрических зубчатых колес, шлифования зубчатых колес дисковыми, червячными и чашечными абразивными кругами, торцовых зубчатых контуров различными инструментами. Названные первообразные и производные от них способы зубообработки, как правило, защищаются соответствующими охранными документами.

При обкатном зубодолблении по пионерному способу ритм формообразующего движения $\Phi_O(\downarrow\Pi_1)$, воспроизводящего образующую (линию зуба), имеет дискретный характер, а движение $\Phi_H(B_2B_3)$, воспроизводящее профиль зубьев (направляющую), осуществляется непрерывно. Это неизбежно ведет к возникновению явления «затирания» при холостом ходе долбяка в движении $\downarrow\Pi_1$, отрицательно сказывающемся на периоде размерной стойкости инструмента. Холостой ход, не являясь формообразующим движением, снижает производительность обработки.

В середине XX столетия был предложен первообразный способ обкатного зуботочения (см. табл. 2, схема 3), обеспечивающий устранение указанных недостатков. Этот способ получен посредством согласования ритмов и изменения правил выполнения формообразующих движений. Дискретный ритм движения $\downarrow\Pi_1$ при зубодолблении заменен поступательным движением Π_3 , а его скорость уменьшена до уровня подачи токарной обработки. Одновременно увеличена круговая частота обкатного резца, имеющего такую же мощность, что и долбяк, определяющую скорость движения обката, до уровня скорости резания при точении. При этом вследствие непрерывности зуботочения отпадает необходимость в движениях врезания и «отскока» инструмента, характерных для зубодолбления. Отметим также, что при зуботочении происходит перестановка воспроизводящих линий: линия, имеющая форму профиля зубчатого колеса, будет образующей, а прямая линия зуба по длине – направляющей. Существенно упрощается структура и функция кинематической подсистемы. Изменится также и обобщенный параметр состояния внутренней среды, так как воздействие на твердое тело заготовки в течение всего цикла обработки будет непрерывным. Производительность зуботочения выше производительности зубофрезерования червячными фрезами и зубодолбления зуборезными долбьяками в среднем в 3 раза. Станкостроение выпускает станки моделей ЕЗ-13, ЕЗ-24, ЕЗ-65 и др., реализующие рассмотренный способ зуботочения.

Технические возможности зуботочения ограничены нарезанием цилиндрических зубчатых колес, так как его практически невозможно переструктурировать для нарезания червячных колес, меньшего колеса в блоке, внутреннего зубчатого венца, зубчатого сектора. Именно поэтому аттрактор 5 зуботочения (см. рис. 1, точка бифуркации E) содержит, как показывают патентные источники информации, кроме рассмотренного еще два способа зуботочения (рис. 3), защищенные авторскими свидетельствами 1034857 и 1135574 соответственно основным и дополнительным.

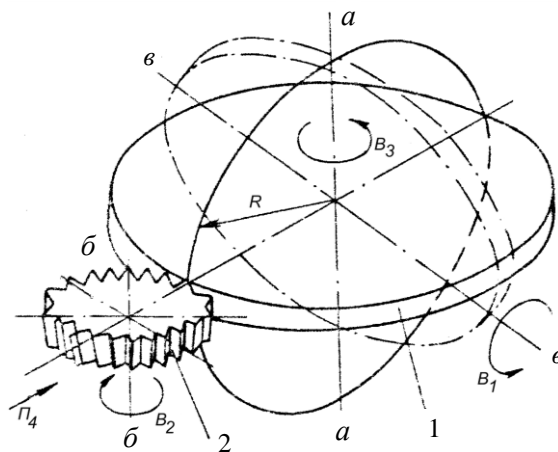


Рис. 3. Способ нарезания зубчатых колес долбяком

При обработке заготовке 1 сообщают движение B_1 вокруг оси $\epsilon - \epsilon$ скорости резания, воспроизводящее образующую (линию зуба колеса). А долбяку 2 и заготовке 1 сообщают согласованные движения соответственно B_2 вокруг оси $\delta - \delta$ и B_3 вокруг оси $a - a$, образующие сложное двухэлементарное движение обката, воспроизводящее направляющую (профиль нарезаемых зубьев). На этапе врезания долбяку сообщают также движение врезания P_4 на высоту зуба.

По утверждению авторов исключение поступательно-возвратного движения долбяка позволяет увеличить скорость резания в 2 – 3 раза. Одновременно устраняется возможность возникновения явления затирания, так как заготовка и долбяк контактируют только при срезании припуска.

При обработке формируется выпуклая форма линии зуба по дуге окружности радиуса R делительной сферы. При необходимости получения иной формы линии зуба, в том числе традиционной при $R = 0$, долбяку 2 сообщают качательно-возвратное движение относительно оси, параллельной оси $\epsilon - \epsilon$ вращения колеса 1.

Математическая модель способа и его функция имеют вид:

$$P = \{M_3\}_K, H^C - H^K, {}^1S = \{{}^K M \cap {}^3 M, M^B\};$$

$${}^K M = (J U E)_O U (J U E)_H U (J U E)_{B_2} U (J U E)_{B_3}; {}^K F = \{H^C - H^K, \Phi_O(B_1), \Phi_H(B_2 B_3), Bp(P_4), / Bc(\uparrow B_5)\};$$

$${}^B M = U^B M_i, \text{ где } i = 3; C_S = C_K + C_B = 9 + 3 = 12.$$

Коэффициент сложности данного способа равен коэффициенту сложности пионерного способа обкатного зубодолбления и больше коэффициента сложности первообразного способа зуботочения.

Универсальность способа ограничена нарезанием цилиндрических прямозубых колес и зубчатых секторов.

Заключение. В результате исследования предложена синергетическая модель эволюции открытого множества способов формообразующей обработки зубчатых колес на основе логико-математического описания пионерных способов нарезания цилиндрических зубчатых колес.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голембиевский, А.И. Анализ способов формообразующей обработки с позиций общей теории систем / А.И. Голембиевский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. – 2009. – № 8. – С. 139 – 146.
2. Голембиевский, А.И. Методика описания способов формообразующей обработки с позиций общей теории систем / А.И. Голембиевский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2010. – № 2. – С. 2 – 11.
3. Дульнев, Г.Н. Введение в синергетику / Г.Н. Дульнев. – СПб.: Проспект, 1998.

Поступила 11.05.2010

SYNERGETIC MODEL OF EVOLUTION OF SET WAYS OF CUTTING OF CYLINDRICAL TOOTHED WHEELS

A. HALEMBIEYUSKI

From positions of the common theory of systems the pioneer ways (S-systems) of cutting of cylindrical toothed wheels are presented. In this group of ways of form-building machining reproduction of a shape of teetees is carried out by means of copying and a rolling action, and a tooth line on length – by means of planing (mortising), milling and turning. On the basis of the system exposition of pioneer ways it is offered synergetic model of evolution of open set of ways of machining by cutting of cylindrical toothed wheels.