

## МАШИНОСТРОЕНИЕ И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 621.01

### МЕТОДИКА ОПИСАНИЯ СПОСОБОВ ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ С ПОЗИЦИЙ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ СИСТЕМ

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

*На основе общей теории систем предложена методика системного описания способов формообразующей обработки (S-систем), представляемых на первом иерархическом уровне в виде объединения относительно обособленных кинематической, базирующей, энергетической и стабилизации силового воздействия подсистем, каждая из которых наделена определенной структурой и функцией. Приведены примеры, раскрывающие характер связей между отдельными подсистемами. На основе принципа последовательной декомпозиции структуры показано представление подсистем, образующих S-систему в виде логико-математических моделей. Предложено понятие коэффициента сложности структуры S-систем в виде суммы коэффициентов сложности, образующих ее подсистем. Использование логико-математических абстракций при описании S-систем упрощает логику суждений, уменьшает роль эмпирики, увеличивает информационную емкость моделей исследуемых S-систем.*

**Введение.** В основе любой теоретической концепции лежит модель изучаемой действительности, наделенная структурой, некоторым числом свойств и функцией. Главная функция модели – быть представлением исследуемого объекта и средством получения о нем теоретической информации. Следовательно, описать способ формообразующей обработки, определенный в [1] как S-система, значит построить ее модель, отображающую структуру, определенную группу свойств и функцию этой системы. Будем называть такое описание системным. Это описание должно давать представление о строении S-систем. Уровень детализации, т.е. выбор структурных элементов, внутрь которых описание не проникает, определяется назначением описания.

Системное описание строится по многоуровневому принципу путем последовательной декомпозиции образующих его подсистем. В общем случае системное описание любой S-системы, функционирующей при статическом задании правил выполнения приемов, на первом иерархическом уровне представляет собой объединение трех взаимосвязанных общей первообразной целевой функцией подсистем: кинематической, базирующей и энергетической. А системное описание S-систем, функционирующих при динамическом управлении правилами выполнения отдельных приемов, т.е. обеспечивающих двухстороннее предельное регулирование внутренней среды процесса обработки, например силы резания, дополнительно содержит подсистему стабилизации силового параметра [1]. Дальнейшая конкретизация структуры должна даваться на стольких уровнях, сколько их требуется для полного представления об основных свойствах S-системы. Естественно, последним уровнем описания будет тот, после которого в пределах единого подхода к различным способам формообразующей обработки дальнейшая декомпозиция невозможна.

Ниже рассматривается методика системного описания S-систем на последующих иерархических уровнях. Эта методика может быть изложена как на вербальном языке, так и посредством логико-математического языка, используемого в общей теории систем [2]. Следует отметить, что использование при описании системных объектов языка математических абстракций упрощает логику суждений, уменьшает роль эмпирики и на этой основе позволяет увеличить информационную емкость модели исследуемого объекта.

**Методика системного описания кинематической подсистемы.** Среди известных S-систем – способов формообразующей обработки – значительную группу составляют такие, для осуществления которых требуются только формообразующие движения  $\Phi_o$  и  $\Phi_n$ , предназначенные для перемещения характеристического образа инструмента [3] (например, резца, фрезы и т.п.) или физического объекта, выполняющего его функцию [4] (например, луч лазера, поле центробежных сил и т.п.) по воспроизводящим линиям (образующей и направляющей). Однако известны также S-системы, целесообразное функционирование которых невозможно без осуществления дополнительных движений, непосредственно подготавливающих формообразующие перемещения характеристического образа. К дополнительным относятся движения деления ( $D$ ), врезания ( $Vp$ ) и вспомогательные движения ( $Vc$ ).

Формообразующие движения могут быть элементарными – вращательными ( $B$ ) и поступательными ( $П$ ), составными и сложными. Элементарные формообразующие движения соответствуют преимуще-

ственно классу  $H^c$  (непрерывно при скольжении) образования производящих линий (образующей и направляющей). Например, при точении цилиндрической поверхности движение  $B_1$  вращения заготовки и движение  $P_2$  резца параллельно оси заготовки воспроизводят соответственно образующую и направляющую. Составные формообразующие движения соответствуют классу  $P$  (прерывисто) образования производящих линий и состоят из двух функционально не связанных элементарных движений. Например, при зубофрезеровании червячной фрезой направляющая зубчатого колеса (линия зуба) воспроизводится составным движением  $B_1^c P_2$ , состоящим из вращения  $B_1$  фрезы и одновременно ее поступательного перемещения  $P_2$  параллельно оси заготовки. Символ « $\wedge$ » в составном движении обозначает обязательную одновременность выполнения составляющих его элементарных движений. Сложные движения состоят из двух и более функционально связанных между собой элементарных движений. Например, соответствующее классу  $H^c$  (непрерывно при качении) движение обката  $B_2 B_3$ , воспроизводящее направляющую (профиль зубчатого колеса) при зубодолблении, состоит из согласованных вращательных движений  $B_2$  долбяка и  $B_3$  заготовки. Отсутствие символа в сложном движении обозначает функциональную связь между образующими его элементарными движениями.

Движение деления предназначено для перемещения в новое геометрическое положение траектории движения формообразования с целью его многократного повторения при образовании сложнопрофильных поверхностей. Например, после шлифования очередной впадины зубчатого колеса дисковым односторонним кругом движением деления переносит траекторию движения круга в следующую впадину зубчатого колеса. В некоторых способах обработки, например при зубодолблении колес долбяком, поступательно-возвратное движение долбяка при поступательном движении, т.е. при резании, является формообразующим, а при возвратном (холостом) ходе – движением деления.

Движение врезания служит для перемещения инструмента в зону формообразования. Оно обычно предшествует движению формообразования. Например, при точении фасонным резцом этап срезания припуска до совпадения лезвия резца с образующей получаемой поверхности выполняется движением врезания. Таким же по функциональному назначению движением осуществляется подвод полноконтактного ролика к обкатываемой поверхности и закрытие штампа при объемной штамповке. Вспомогательные движения, например, позиционирование и транспортирование характерны для способов обработки по роторной схеме. К вспомогательным относится также движение отвода (отскока) инструмента от заготовки (или наоборот) при холостом ходе при механическом резании. Это движение предназначено для устранения обратного резания или затирания инструмента о заготовку. Практически все известные способы строгания и долбления осуществляются с использованием этого движения, выполняемого после каждого рабочего хода, т.е. на холостом ходе.

Формообразующие и вспомогательные движения (перемещения характеристического образа инструмента относительно заготовки) принято называть исполнительными движениями. Для их выполнения любая S-система должна обладать вполне определенной структурой (механикой), обеспечивающей взаимодействующие объекты информацией о закономерностях этих перемещений. Такая структура является основой кинематической подсистемы. Будем рассматривать кинематическую подсистему в виде объединения структур (подсистем второго уровня) отдельных исполнительных движений:

$${}^k M = \bigcup_{i=1}^n {}^k M_i,$$

где  ${}^k M_i$  – структура отдельного движения;  $n$  – количество отдельных движений.

Тогда функция кинематической подсистемы есть объединение функций структур отдельных исполнительных движений:

$${}^k F = \bigcup_{i=1}^n {}^k F_i,$$

где  ${}^k F$  – функция кинематической подсистемы;  ${}^k F_i$  – функция структуры отдельного движения.

Функцию кинематической подсистемы представим как множество параметров:

$${}^k F = \{P, \Theta, \{\Phi_i\}, \{G_j\}\},$$

где  $P$  и  $\Theta$  – соответственно мощность характеристического образа инструмента и класс образования поверхности;  $\{\Phi_i\}$  – конечное множество исполнительных движений;  $\{G_j\}$  – конечное множество отношений между формообразующими и вспомогательными движениями.

Передача информации о закономерностях перемещений невозможна без энергии. Причем она не используется для воздействия на твердое тело, а предназначена только для переноса кинематической

информации. Следовательно, структуру отдельного исполнительного движения можно рассматривать как объединение информационного и энергетического комплексов:

$${}^k M_i = J_i \cup E_i,$$

где  $J_i$  – информационный комплекс;  $E_i$  – энергетический комплекс.

Функцию структуры отдельного движения представим как множество параметров:

$${}^k F_i = \{\Theta_L, \Phi, g\},$$

где  $\Theta_L$  – класс образования воспроизводящей линии;  $\Phi$  – исполнительное движение;  $g$  – отношение между элементарными движениями, составляющими исполнительное движение.

Для оценки сложности кинематической подсистемы введем критерий сложности, который будем определять как общее количество информационных и энергетических комплексов подсистемы:

$$C_k = C_J + C_E = \sum_i J_i + \sum_j E_j,$$

где  $C_k$  – критерий сложности кинематической подсистемы;  $C_J$  и  $C_E$  – соответственно критерий сложности информационного и энергетического комплексов.

Очевидно, минимальный критерий  $C_k$  характеризует наименьшее количество необходимых информационных и энергетических комплексов и, следовательно, наиболее простую кинематическую подсистему S-системы. Оценивая различные кинематические подсистемы критерием сложности можно определить пути уменьшения сложности кинематической подсистемы. Задачу уменьшения  $C_k$  можно решать следующими двумя путями: 1) переходом к S-системам, образующим обе или одну из воспроизводящих линий по классу  $E$ ; 2) переносом функции некоторых энергетических комплексов в зону контакта заготовки и инструмента. Первый путь объясняет появление и интенсивное развитие таких процессов, как литье под давлением, непрерывное литье, различные виды штамповки, формирование изделий в электромагнитном поле и т.п., второй – появление процессов обработки поверхностным пластическим деформированием и резание самовращающимися резами.

В станковедении каждое движение характеризуется следующими пятью параметрами: траекторией, путем, направлением, скоростью и исходной точкой [5]. В других частных направлениях машиноведения понятие о параметрах исполнительных движений не рассматривается, что можно объяснить существенно меньшим, чем в станковедении, разнообразием формообразующих движений. Тем не менее это понятие носит всеобщий характер независимо от вида воздействия на твердое тело и класса технологических машин.

При описании S-систем рассматриваются наиболее общие качественные вопросы образования поверхностей. В этом случае наиболее важным параметром является траектория. Определенность траектории конкретного исполнительного движения обеспечивается информационным комплексом, а энергетический комплекс служит для обеспечения информационного комплекса энергией. Форма траектории взаимно однозначно соответствует конкретной воспроизводящей линии и может воспроизводиться элементарными, составными и сложными движениями, рассмотренными выше. Информация о траектории конкретного исполнительного элементарного движения заложена в соответствующей вращательной или поступательной элементарной кинематической паре. К подвижному звену этой пары подводится энергия от какого-либо источника. В технологических машинах связь между подвижными звеньями кинематических пар и источником (или источниками) энергии осуществляется кинематическими цепями различной протяженности. В S-системах источники энергии и кинематические связи непосредственно не указываются, а выражаются в описаниях и иллюстрирующих их схемах взаимодействия объектов посредством соответствующих движений. Будем называть информационным комплексом кинематическую пару, несущую информацию о траектории элементарного исполнительного движения, а ее связь с источником энергии и этот источник – энергетическим комплексом.

Информация о траектории сложного исполнительного движения, состоящего из двух и более строго согласованных элементарных движений, заложена в элементарных кинематических парах и связывающей их кинематической цепи, к одному из звеньев которой, называемому звеном соединения связей, подводится энергия от соответствующего источника. В этом случае информационным комплексом будем называть совокупность соответствующих элементарных кинематических пар вместе с их связью, а энергетическим – источник энергии и его связь с информационным комплексом.

Известно, что в технологических машинах, реализующих один и тот же способ обработки, может использоваться для выполнения исполнительных движений как один, так и несколько источников энергии. В описаниях способов формообразующей обработки количество источников энергии не конкретизируется. Однако, принимая во внимание то, что структура каждого исполнительного движения обязатель-

но содержит информационный и энергетический комплексы, а расход энергии для переноса информации в S-системах зависит только от количества информационных комплексов, эту неопределенность можно устранить. Поэтому будем считать, что любая S-система имеет общий источник энергии, а важнейшим элементом каждого конкретного энергетического комплекса является связь, передающая энергию от источника энергии к подвижному звену информационного комплекса.

Представим кинематическую подсистему классического способа нарезания резьбы фасонным резцом (рис. 1) в виде теоретико-множественной модели. Данная S-система характеризуется тем, что заготовке 1, определенным образом ориентированной в пространстве, сообщают вращательное движение  $B_1$ , согласованное с поступательным движением  $P_2$  резца 2, профиль которого соответствует (зеркально отображает) профиль нарезаемой резьбы. Поэтому характеристический образ резца –  $\{E\}_1$ . Следовательно,

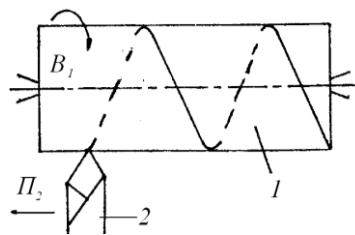


Рис. 1. Схема способа нарезания резьбы

данная S-система не имеет кинематической структуры, воспроизводящей образующую (профиль резьбы), а ее функцию выполняет характеристический образ инструмента. Направляющая (винтовая линия) нарезаемой резьбы воспроизводится сложным исполнительным движением  $\Phi_n(B_1, P_2)$ , состоящим из согласованных между собой вращательного  $B_1$  движения заготовки 1 и поступательного  $P_2$  движения резца 2. Это движение является движением скорости резания. Класс образования направляющей  $H^c$  (непрерывно при скольжении).

При функционировании анализируемой S-системы энергия механического воздействия подводится через кинематическую подсистему, а количество вещества, удаляемого в единицу времени, определяет потребление энергии во времени. Следовательно, энергетическая и кинематическая подсистемы пересекаются. Кинематическая подсистема несет также информацию о траектории исполнительного движения, т.е. осуществляет обмен информацией между взаимодействующими объектами. Эта информация определяет форму направляющей получаемой винтовой поверхности. Связь между этими подсистемами носит преимущественно вещественно-энергетический характер. Таким образом, системное описание рассматриваемой S-системы на первом уровне имеет вид:

$${}^1S_s = \{{}^kM \cap {}^bM, {}^eM\},$$

где  ${}^kM, {}^bM, {}^eM$  – соответственно кинематическая, базирующая и энергетическая подсистемы.

Структура, воспроизводящая направляющую (винтовую линию), имеет вид:

$${}^kM_n = JJ \cup E.$$

Функция этой структуры есть множество

$${}^kF_n = \{H^c, \Phi_n(B_1, P_2)\}.$$

Следовательно, полная структура кинематической подсистемы описывается формулой, воспроизводящей направляющую, т.е.

$${}^kM = {}^kM_n.$$

Функция кинематической подсистемы есть множество

$${}^kF = \{\{E\}_1, E - H^c, \Phi_n(B_1, P_2), g\}.$$

Отношение  $g$  между элементарными движениями, образующими сложное движение  $\Phi_n(B_1, P_2)$ , устанавливается на основе следующих расчетных перемещений:

*один оборот заготовки в движении  $B_1 \rightarrow t$  мм перемещения резца 2 в движении  $P_2$ .*

Критерий сложности кинематической подсистемы (общее количество информационных и энергетических комплексов) равен 3.

**Методика системного описания базирующей подсистемы.** Любой способ формообразующей обработки предусматривает определенную исходную ориентацию заготовки относительно характеристического образа инструмента. Для этого в технологических машинах используются различные установочные приспособления, материализующие технологический комплект баз. Как известно, комплект баз лишает заготовку всех шести степеней свободы: трех поступательных движений вдоль осей координат и трех вращений вокруг указанных осей. Это условие называют правилом шести точек. Базы, в том числе технологические, различаются по отнимаемым степеням свободы и характеру проявления. По отнимаемым степеням свободы различают установочную, направляющую, опорную, двойную направляющую и двойную опорную, а по характеру проявления – явную и скрытую.

На рисунке 2 приведены примеры базирования цилиндрического зубчатого колеса при качественно различной длине его ступицы. Комплект баз при базировании зубчатого колеса с длинной ступицей (рис. 2, а) состоит из двойной направляющей скрытой базы I, отнимающей четыре степени свободы (точки 1, 2, 3, 4), опорной явной базы II, отнимающей одну степень свободы (точка 5), и опорной скрытой базы III, отнимающей также одну степень свободы (точка 6). При обработке узкого зубчатого колеса качественный характер баз изменяется. В этом случае комплект баз включает (рис. 2, б) установочную явную базу I, отнимающую три степени свободы (точки 1, 2, 3), двойную опорную скрытую базу II, отнимающую две степени свободы (точки 4, 5), и опорную скрытую базу III, отнимающую одну степень свободы (точка 6).

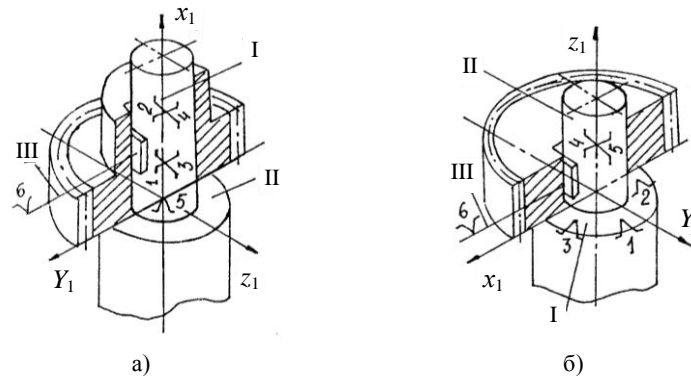


Рис. 2. Схемы базирования зубчатого колеса:  
а – с длинной ступицей; б – с короткой ступицей

Аналогично можно рассматривать комплекты баз, обеспечивающих определенность установки заготовок. При разработке технологического процесса изготовления конкретной детали выбор оптимального комплекта баз из совокупности возможных имеет принципиальное значение. В то же время качественные различия отдельных комплектов баз незначительны при функционировании S-систем. Существен лишь сам факт базирования заготовки, обеспечивающий ее определенную ориентацию относительно характеристического образа инструмента. Это позволяет, абстрагируясь от конкретных конструкций рассматривать базирующую подсистему любой S-системы как счетное множество баз (подсистем второго уровня), обеспечивающих определенность исходной ориентации заготовки относительно характеристического образа инструмента:

$${}^6M = \bigcup_{i=1}^3 {}^6M_i,$$

где  ${}^6M_i$  – отдельная база базирующей подсистемы.

Характеристику баз по числу отнимаемых степеней свободы положим в основу формализации баз. Для этого в математических моделях различных баз (таблица) будем указывать отнимаемые степени свободы.

#### Математические модели стандартных баз

Принятое название базы	Модель базы
Двойная направляющая	${}^6M^{1-4}$
Установочная	${}^6M^{1-3}$
Направляющая	${}^6M^{4-5}$
Опорная	${}^6M^6$
Двойная опорная	${}^6M^{4-5}$

В приведенных примерах базирование рассмотрено применительно к материализации комплекта баз с помощью установочных приспособлений, не имеющих непосредственных функциональных связей с характеристическим образом инструмента. В формообразующей обработке известны также S-системы, в которых полностью или частично функцию базирующей подсистемы выполняет характеристический образ.

На рисунке 3 приведена схема базирования втулки при протягивании шлицевого отверстия. Для обработки втулки 2 прижимается к подкладной плите 1 протяжного станка и центрируется до начала среза припуска по цилиндрической поверхности протяжки 3. Комплект баз для данного способа состоит из трех явных баз. Установочная база I лишает заготовку трех степеней свободы (точки 1, 2, 3) и материализуется элементом (плитой 1) технологической машины. Направляющая база II лишает заготовку двух степеней свободы (точки 4, 5), а опорная III – одной степени свободы (точка 6). Причем направ-

ляющая и опорная базы материализованы на инструменте. Следовательно, в способе протягивания шлицевой втулки характеристический образ инструмента выполняет функцию двух баз.

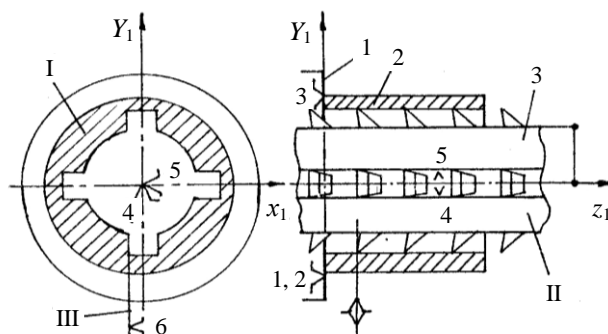


Рис. 3. Схема базирования шлицевой втулки при протягивании

При формообразовании изделия из жидкого металла в управляемом магнитном поле функцию базирющей подсистемы выполняет поле, т.е. характеристический образ инструмента. Аналогично функцию базирющей подсистемы выполняет характеристический образ инструмента при полноконтактной обкатке сферической поверхности, при объемной штамповке и в ряде других способах формообразующей обработки.

Таким образом, независимо от конструктивных особенностей базы, составляющие базирющую подсистему любой S-системы можно разделить на две группы. Первую составляют базы, не имеющие структурных связей с характеристическим образом инструмента, а вторую – базы, функция которых передана характеристическому образу. На основании этого функцию базирющей подсистемы будем рассматривать как множество параметров:

$${}^{\delta}F = \{ \{W_i\}, \{Q_j\} \},$$

где  ${}^{\delta}F$  – функция базирющей подсистемы;  $W_i$  – конечное множество вариантов базирования для конкретной S-системы;  $Q_j$  – конечное множество отношений между базами и характеристическим образом инструмента.

Рассмотренные примеры показывают, что чем больше баз первой группы содержит базирющая подсистема, тем она сложнее, и наоборот. Это позволяет для оценки сложности базирющей подсистемы ввести критерий сложности, который будем определять как общее количество баз, подлежащих материализации в виде конкретных установочных приспособлений или элементов:

$$C_{\delta} = \bigcup_{q=1}^3 M_q,$$

где  $C_{\delta}$  – критерий сложности базирющей подсистемы;  ${}^{\delta}M_q$  – база, материализуемая установочным приспособлением или элементом.

Базирющая подсистема, являясь по определению аналогом технологического комплекта баз, всегда содержит три явных или скрытых базы в любом сочетании. Следовательно, максимальный критерий сложности базирющей подсистемы равен трем, а минимальный – нулю. Из определения понятия критерия сложности выводится единственный путь упрощения базирющей подсистемы, заключающийся в передаче функций одной или нескольких баз характеристическому образу инструмента.

**Методика системного описания энергетической подсистемы.** Процесс воздействия на заготовку с целью получения на ней заданной поверхности осуществляется посредством подвода в зону обработки энергии различного вида. Вид используемой энергии определяет природу физико-химического воздействия, играющего основную роль в изменении исходного состояния заготовки.

Среди известных S-систем значительную группу составляют способы формообразующей обработки, для осуществления которых используется только один из возможных первичных видов физического или химического воздействия непосредственно для технологических целей. Причем значительную часть составляют S-системы, основанные на использовании механической энергии.

В промышленности непрерывно возрастает применение относительно новых материалов: высокопрочных, нержавеющей, жаропрочных сталей и сплавов, тугоплавких металлов, металло- и минералокерамики, пластмасс с особыми физико-механическими свойствами. Обработка таких материалов традиционными способами, основанными на механическом воздействии на твердое тело, затруднена, а в ряде случаев практически невозможна. Это определило направление интенсивных поисков качественно новых процессов обработки. Появились группы S-систем, основанные на использовании иного вида энергии

для технологических целей, например, электрической, а затем и группы S-систем, в которых используется одновременно два и более вида энергии.

Будем называть природу первичного воздействия на твердое тело, в необходимом единстве с которой функционируют кинематическая и базирующая подсистемы, внутренней средой S-системы. Внутренняя среда может быть простой однокомпонентной и сложной, состоящей из нескольких простых компонент. Вполне естественно предположить, что каждая компонента внутренней среды воспроизводится определенной структурой. При разработке различных по конструкции технологических машин, реализующих один и тот же способ формообразующей обработки, в структуре, воспроизводящей конкретную компоненту внутренней среды, возможны как качественные, так и количественные различия. Однако в соответствии с решаемыми в данном исследовании вопросами они не существенны при рассмотрении структуры и функции S-систем. В данном случае существен сам факт энергетического воздействия на твердое тело и, следовательно, необходимость в энергетической подсистеме. Это позволяет рассматривать энергетическую подсистему, воспроизводящую внутреннюю среду S-системы, в виде объединения отдельных структур (подсистем второго уровня), каждая из которых воспроизводит одну компоненту данной среды:

$${}^{\circ}M = \bigcup_{i=1}^m {}^{\circ}M_i,$$

где  ${}^{\circ}M$  – энергетическая подсистема;  ${}^{\circ}M_i$  – структура отдельной энергетической компоненты;  $m$  – количество энергетических компонент.

Рассмотрим примеры некоторых известных S-систем, признанных в разное время изобретениями, энергетическая подсистема которых содержит более одной составляющих ее энергетических структур.

На рисунке 4 показана схема способа точения в электростатическом поле. Этот способ отличается от классического способа токарной обработки тем, что на материал заготовки 1 дополнительно воздействуют электростатическим полем, образуемым между резцом 2, являющимся анодом, и металлической пластиной 3, являющейся катодом. При этом поле противонаправлено электродвижущей силе собственного поля, возникающего в зоне обработки вследствие резания. В анализируемой S-системе внутренняя среда содержит две энергетические компоненты: первая – первичное механическое воздействие на твердое тело – обеспечивает основную первообразную функцию S-системы, заключающуюся в срезании припуска с заготовки, т.е. в образовании заданной поверхности, форма которой определяется кинематической подсистемой; вторая компонента – электростатическое воздействие – обеспечивает дополнительную функцию, заключающуюся в нейтрализации электродвижущей силы, возникающей вследствие срезания припуска. Вторая компонента позволяет достичь дополнительной цели – повышения стойкости инструмента.

Обе компоненты внутренней среды воспроизводятся соответствующими структурами энергетической подсистемы. Отметим также, что одна из компонент внутренней среды (механическое воздействие) воспроизводится энергетической структурой, совпадающей со структурой кинематической подсистемы, т.е. энергия механического воздействия переносится от источника этой энергии в зону воздействия посредством кинематической подсистемы. Вторая компонента внутренней среды (электростатическое поле) воспроизводится отдельной структурой энергетической подсистемы.

На рисунке 5 приведена схема способа точения с опережающим пластическим деформированием. Этот способ отличается от предыдущего тем, что на материал заготовки 1 оказывает дополнительное воздействие не электростатическое поле, а механическая энергия. Внутренняя среда такой S-системы содержит также две компоненты: первая – механическая, обеспечивает основную функцию – срезание припуска резцом 2 и образование требуемой поверхности; вторая – дополнительная механическая – обеспечивает дополнительную функцию – пластическое деформирование роликом 3 материала заготовки на некотором расстоянии от зоны срезания припуска.

Как утверждают авторы данного способа, опережающее пластическое деформирование позволяет достичь дополнительной цели – повышения стойкости резца и производительности обработки. Обе механические компоненты внутренней среды воспроизводятся соответствующими составляющими энергетической подсистемы. Первая механическая компонента, обеспечивающая срезание припуска, как и в предыдущем примере, создается посредством кинематической подсистемы. Дополнительное механическое воздействие обеспечивается также кинематической подсистемой. Действительно, глубина проникновения опережающей пластической деформации материала заготовки зависит от установки ролика 3 относительно резца 2, что определяет в конечном итоге поток механической энергии по кинематической подсистеме, поступающей в зону деформирования, а скорость распространения деформации вдоль поверхности обработки – от диаметра ролика 3 и передаточного отношения между заготовкой и роликом. Следует также отметить, что вращение ролика 3 не является формообразующим или вспомогательным движением, подготавливающим формообразующие движения.

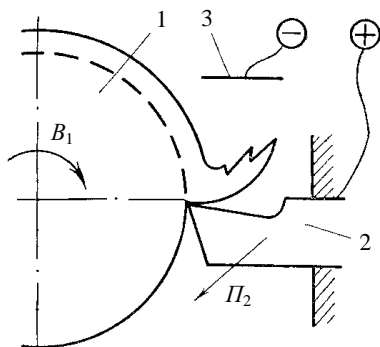


Рис. 4. Схема способа точения с наложением электростатического поля

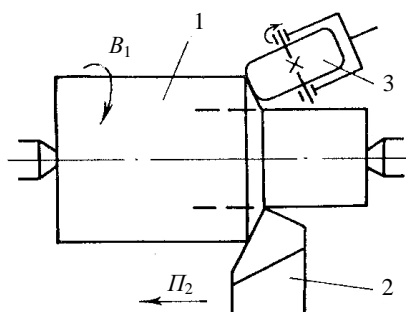


Рис. 5. Схема способа точения с опережающим пластическим деформированием

Рассмотренный способ точения с опережающим пластическим деформированием можно изменить таким образом, чтобы вторая компонента внутренней среды воспроизводилась отдельной составляющей энергетической подсистемы, независимой от составляющей кинематической подсистемы, воспроизводящей образующую получаемой поверхности [4]. Такое видоизменение позволит управлять характеристиками процесса обработки в более широких пределах, чем при использовании рассмотренного способа – прототипа.

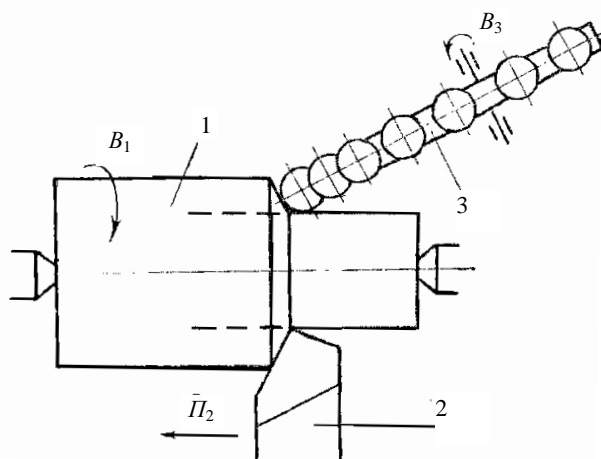


Рис. 6. Схема способа точения с опережающим пульсирующим деформированием

Решение данной задачи иллюстрируется схемой, приведенной на рисунке 6. Здесь дополнительное механическое воздействие – пластическое деформирование заготовки – осуществляется инструментом 3, выполненным в виде диска, в периферийной части которого размещены свободно вращающиеся шарики. При обработке деформирующему инструменту 3 сообщают вращательное движение  $B_3$ , у которого круговую частоту можно изменять в широких пределах независимо от скорости воспроизведения образующей воспроизводимой поверхности движением  $B_1$  заготовки 1. Характер воздействия при этом будет динамичным пульсирующим, что объясняется иным характеристическим образом деформирующего инструмента. Глубина проникновения опережающей пластической деформации при таком виде воздействия будет зависеть не только от усилия прижатия шариков к заготовке в статическом состоянии, но и от круговой частоты движения  $B_3$  инструмента 3.

В свою очередь это позволит уменьшить поток энергии, подводимой к зоне обработки, через кинематическую подсистему, воспроизводящую геометрическую форму обрабатываемой поверхности.

Отметим также, что вращение деформирующего инструмента 3 не является формообразующим или вспомогательным движением, подготавливающим формообразующее. Причем структура, воспроизводящая это движение, входит в энергетическую подсистему рассматриваемой S-системы.

В [1] описан способ электролитического сверления отверстий в токопроводящих труднообрабатываемых материалах. Энергетическая подсистема этой S-системы содержит три составляющие, каждая из которых воспроизводит одну компоненту внутренней среды. Составляющая энергетической подсистемы, обеспечивающая механическое воздействие (сверление алмазным сверлом), совмещена (пересекается) с кинематической подсистемой. Два других вида первичного воздействия: электрохимическое и электроэрозионное обеспечиваются относительно выделенными структурными составляющими энергетической подсистемы.

В формообразующей обработке возможны S-системы, в которых энергетическая подсистема параллельно выполняет функции других подсистем. Поясним это на примере способа формообразования изделий из расплава в управляемом электромагнитном поле. В этой S-системе электромагнитное поле наделено функцией характеристического образа, т.е. является инструментом, посредством которого воздействуют на вещество расплава. Поле, охватывая расплав (заготовку), обеспечивает ее базирование и процесс формообразования. Следовательно, энергетическая подсистема рассматриваемой S-системы одновременно выполняет функцию еще двух подсистем: базирющей и кинематической. Такой способ формообразующей обработки имеет простейшую структуру. К этой группе S-систем можно отнести способы, в которых используется эффект гальванопластики.



Функцию энергетической подсистемы на основании приведенных примеров, охватывающих в наиболее общем виде все возможные варианты воздействия на твердое тело, можно представить множеством

$${}^3F = \{\{T_i\}, \{G_q\}, \{\eta\}, \{C_j\}\},$$

где  ${}^3F$  – функция энергетической подсистемы;  $\{T_i\}$  – конечное множество составляющих энергетической подсистемы;  $\{G_q\}$  – обобщенный параметр состояний каждой компоненты внутренней среды;  $\{\eta\}$  – конечное множество уровней состояния каждой компоненты;  $\{C_j\}$  – конечное множество отношений между составляющими энергетической подсистемы и другими подсистемами S-системы.

Обобщенный параметр состояний компоненты внутренней среды есть вектор

$$G_q = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_q),$$

составляющие которого – мощность, интенсивность, форма, длительность воздействия на твердое тело и другие частные параметры компоненты, задаваемые формулой способа формообразующей обработки.

Независимо от конструкций устройств, реализующих энергетическую подсистему S-систем в конкретных технологических машинах, все структурные составляющие этой подсистемы можно разделить на две группы. Первая содержит энергетические составляющие, функции которых переданы отдельным структурам кинематической подсистемы. Как правило, составляющие кинематической подсистемы являются также составляющими энергетической подсистемы, осуществляющей механическое воздействие на материал заготовки. Естественно, такое совмещение упрощает энергетическую подсистему и всю S-систему в целом. Вторая группа включает энергетические составляющие, функции которых не переданы составляющим других подсистем S-системы. Следовательно, чем больше в энергетической подсистеме составляющих, функция которых перенесена в другие подсистемы, тем она проще, и наоборот. Это позволяет для оценки сложности энергетической подсистемы ввести критерий сложности, который будем определять как общее количество составляющих энергетической подсистемы, функции которых не переданы другим подсистемам:

$$C_3 = \bigcup_{v=1}^p {}^3M_v,$$

где  $C_3$  – критерий сложности энергетической подсистемы;  ${}^3M_v$  – составляющая энергетической подсистемы, функция которой не передана другой подсистеме.

Минимальное значение критерия сложности энергетической подсистемы равно нулю, а его максимальное значение может быть равно количеству первичных воздействий на твердое тело.

Из определения понятия критерия сложности энергетической подсистемы выводится единственный путь ее упрощения, заключающийся в передаче функций отдельных составляющих или подсистемы в целом другим подсистемам S-системы.

**Методика описания подсистемы стабилизации силового воздействия.** Среди известных S-систем относительно небольшую группу составляют способы формообразующей обработки, структура которых содержит подсистему стабилизации силового воздействия посредством устранения влияния случайных факторов в процессе резания. К этим факторам относятся непостоянство припуска и микротвердости заготовки от среза к срезу в зоне контакта резец – заготовка. Будем называть эту зону средой резания, или в общем случае средой силового воздействия. Силовое воздействие может регистрироваться в виде силы резания, крутящего момента или мощности резания. А стабилизировать силовое воздействие можно посредством изменения подачи или скорости резания в противофазе с изменением этого воздействия. Отсюда следует, что среда резания является источником информации и энергии для подсистемы стабилизации силового воздействия. В свою очередь подсистема стабилизации силового воздействия является источником информации для кинематической подсистемы. Это позволяет утверждать, что рассматриваемая подсистема пересекается с кинематической и энергетической подсистемами. Структура подсистемы стабилизации силового воздействия – это объединение информационного и энергетического комплексов:

$${}^cM_i = J_i \cup E_i,$$

где  $J_i$  и  $E_i$  – соответственно информационный и энергетический комплексы подсистемы стабилизации силового параметра. Функцию этой подсистемы можно представить в виде множества

$${}^cF_i = \{\{L_k\}, \{Q_g\}\},$$

где  $L_k$  – конечное множество отношений с другими подсистемами;  $Q_g$  – обобщенный параметр состояния среды силового воздействия.

Обобщенный параметр состояния среды силового воздействия есть вектор

$$Q_g = (\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_q),$$

составляющие которого – мощность, интенсивность, быстродействие и другие частные параметры компоненты, задаваемые формулой способа формообразующей обработки. Функция подсистемы стабилизации

силового воздействия не передается другим подсистемам S-систем. Следовательно, коэффициент сложности этой подсистемы равен  $C_c = 1$ . Информация, вырабатываемая подсистемой стабилизации силового воздействия, сообщается структурным составляющим кинематической подсистемы, осуществляющими формообразующие движения скорости резания или подачи. Принципиальное значение при этом имеет выбор структурной составляющей кинематической подсистемы, для которой подсистема стабилизации силового воздействия является источником информации. Рассмотрим это обстоятельство на конкретных примерах. *Способ нарезания резьбы фасонным резцом* (см. рис. 1) содержит в кинематической подсистеме только сложную двухэлементарную структурную составляющую скорости резания  $\Phi_n(B_1P_2)$ , воспроизводящую направляющую (винтовую линию). Подсистема стабилизации силового воздействия является источником информации для названной структурной составляющей кинематической подсистемы. При этом силовое воздействие можно регистрировать в виде силы резания, крутящего момента или мощности резания. А стабилизировать его только посредством изменения скорости резания в противофазе с изменением воздействия. *Способ точения цилиндрической поверхности с наложением электростатического поля* (см. рис. 2) содержит в кинематической подсистеме две элементарные формообразующие составляющие: скорости резания  $\Phi_o(B_1)$ , воспроизводящую образующую (окружность); подачи  $\Phi_n(P_2)$ , воспроизводящую направляющую (прямую, параллельную оси обрабатываемой поверхности). В этом способе подсистема стабилизации силового воздействия может быть источником информации для любой из названных структурных составляющих кинематической подсистемы. При стабилизации силового воздействия посредством управления скоростью резания силовое воздействие можно регистрировать в виде крутящего силы резания, момента или мощности резания, а при стабилизации этого воздействия посредством управления подачей – только в виде силы резания. Способы формообразующей обработки со стабилизацией силового воздействия реализуются в высокоточных станках с ЧПУ, оснащенных системами адаптивного двухстороннего предельного регулирования процесса резания.

**Заключение.** Разработана методика иерархического описания способов формообразующей обработки, составляющих непрерывно пополняющийся класс S-систем. На первом иерархическом уровне любая S-система независимо от вида физического объекта, воздействующего на материал заготовки, и используемой при этом энергии рассматривается как объединение относительно обособленных кинематической, базирующей, энергетической и стабилизирующей силовое воздействие подсистем. На последующих уровнях на основе соответствующих примеров рассматривается детальное описание структуры указанных подсистем. Сформулировано понятие коэффициента сложности структуры S-системы в виде суммы коэффициентов сложности составляющих ее подсистем. На основе коэффициента сложности намечены пути упрощения S-систем. Системное описание способов формообразующей обработки осуществляется на логико-математическом языке, используемом в общей теории систем.

#### 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. Bertalanffy, L. Ogólna teoria systemów / L. Bertalanffy. – Warszawa: Polskie wydawnictwo narodowe, 1984.
3. Коновалов, Е.Г. Основы новых способов металлообработки / Е.Г. Коновалов. – Минск: Наука и техника, 1961.
4. Голембиевский, А.И. Основы системологии способов формообразующей обработки в машиностроении / А.И. Голембиевский. – Минск: Наука и техника, 1986.
5. Федотенок, А.А. Кинематическая структура металлорежущих станков / А.А. Федотенок. – М.: Машиностроение, 1970.

Поступила 11.11.2009

#### METHODOLOGY OF DESCRIPTION OF FORMING TREATMENT FROM THE POSITION OF GENERAL THEORY OF SYSTEMS

A. HALEMBIYEUSKI

*Methodology of systems description of different methods of forming treatment (S-systems) is suggested on the basis of general theory. These methods are represented on the first hierarchical level in the form of unification of relatively isolated subsystems such as kinematic, basing, energetic and stabilization of power influence. Each of these subsystems is given a definite structure and function. Given examples disclose a connection character between separate subsystems. Subsystems representation is shown in terms of the principle of consistent decomposition of structure, which forms S-system in the shape of logic-mathematical models. It is given the notion of complexity coefficient of S-systems structure in the form of the amount of complexity coefficients, forming its subsystems. The usage of logic-mathematical abstractions, while S-systems description, simplifies the logics of judgment, decreases the role of empirics, increases informational capacity of investigating S-systems models.*