

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ МЕХАТРОННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ

Хейфец М.Л., Бородавко В.И., Пынькин А.М., Акулович Л.М., Зевелева Е.З.

(ГНПО «Центр» НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», г. Минск, Беларусь,

УО «Полоцкий государственный университет», г. Новополоцк, Беларусь)

Тел.: +375 (17) 284-07-75; ф. +375 (17) 284-03-75; E-mail: [mlk-z@mail.ru](mailto:mlk-z@mail.ru)

**Abstract:** *It is developed the methodology of optimizing synthesis of mechatronics technological complexes of highly effective processing of the products, which includes structural synthesis of technological complexes of highly effective processing; the analysis of adaptive management in mechatronics complexes; parametrical optimization of productions and means of equipment. Application of mechatronics technological complexes in the conditions of small-scale production allows to increase productivity due to the combined methods of processing application and production automation by its flexible readjustment and adaptive management.*

**Key words:** *mechatronics, technological complexes, optimizing synthesis.*

**Введение.** Интеграция электромеханики и микроэлектроники при компоновке машин привела к появлению комплексных интегрированных мехатронных модулей движения рабочих органов и узлов машин, а также создаваемого на их основе оборудования. Такая интеграция требует использования систем компьютерного управления движениями, деталями, инструментами, источниками энергии, транспортными и другими механизмами [1]. В результате составляющие части мехатронных технологических комплексов (ТК) не просто дополняют друг друга, но и объединяются таким образом, чтобы образованная система обладала качественно новыми свойствами.

Элементы интегрированных мехатронных ТК выбираются разработчиком на стадии функционального проектирования, а затем обеспечивается необходимая конструкторская и технологическая поддержка при производстве и эксплуатации комплекса [2, 3]. В этом радикальное отличие мехатронных систем от традиционных, в которых пользователь самостоятельно объединяет в систему разнородные механические, электронные и информационно-управляющие устройства. Методологической основой разработки мехатронных систем служат методы проектирования, заключающиеся в одновременном и взаимосвязанном синтезе всех компонентов системы [3].

В мехатронных системах для обеспечения высокой точности реализации сложных движений применяются методы интеллектуального управления [4]. Данная группа методов опирается на новые идеи в теории управления, современные аппаратные и программные средства вычислительной техники и концепцию виртуального производства [5, 6].

Мехатронные системы включают механическую, электромеханическую, электронную и управляющую (использующую компьютеры и микропроцессоры) части [1, 3]. В нее входят: датчики состояния как внешней среды, так и самой системы управления; источники энергии; исполнительные механизмы; усилители; вычислительные элементы (компьютеры и микропроцессоры). Мехатронная система представляет собой единый комплекс электромеханических и электронных элементов и средств вычислительной техники, между которыми осуществляется непрерывный обмен энергией и информацией. Поэтому при проектировании комплексов следует учитывать динамику протекающих процессов, обеспечивая их устойчивость и

требуемое качество, что достигается методами теории автоматического управления [7, 8].

**Структура мехатронного технологического комплекса.** Функционально простую мехатронную систему ТК можно подразделить на следующие составные части [1, 3]: исполнительные устройства (объект управления и приводы), информационные устройства (датчики внутреннего состояния системы и датчики состояния внешней среды) и систему управления (компьютер и микропроцессоры) (рис. 1).

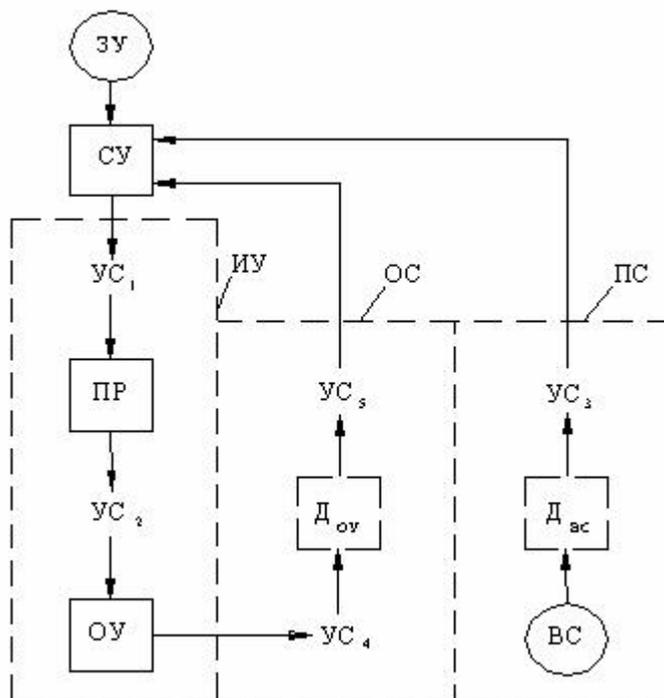


Рис. 1. Составные части мехатронной системы ТК:

ИУ – исполнительные устройства; ОС – обратная связь; ПС – прямая связь;  
 ЗУ – задание на управление; СУ – система управления; УС – устройство сопряжения; ПР – приводы; ОУ – объект управления; Д<sub>ов</sub> – датчики состояния объекта управления; Д<sub>вс</sub> – датчики состояния внешней среды; ВС – внешняя среда

Взаимодействие между этими частями, реализующее прямые и обратные связи в системе, осуществляется через устройство сопряжения (интерфейс).

Система управления включает аппаратные средства и программное обеспечение, которое управляет согласованной работой аппаратных средств и обеспечивает синхронизацию процессов сбора и обработки данных, поступающих от информационных устройств, с процессами, управляющими исполнительными устройствами.

В результате мехатронный производственный модуль конструктивно подразделяется на электрическую и механическую составляющие, а также систему управления.

Обобщенная схема производственного модуля ТК (рис. 2) должна содержать все необходимые составляющие мехатронной системы: объекты управления; приводы; датчики; управляющие устройства, сопряженные между собой; систему программного обеспечения.

Гибкость функционирования мехатронной системы в виртуальном производстве обеспечивается применением универсальных рабочих органов (инструментов и источников энергии), способных выполнять различные операции, или изменением модулей сменного инструмента, которые выбираются системой управления в соответствии с выполняемыми операциями, или управлением источниками энергии. В таких системах заранее определить число и вид необходимых исполнительных устройств и датчиков невозможно. Возникает необходимость решить две задачи:

- 1) обработать и систематизировать информацию, поступающую с датчиков;
- 2) обеспечить синхронизацию между этой информацией и движением исполнительных устройств.

Это достигается программным обеспечением, управляющим работой соответствующих вычислительных средств.

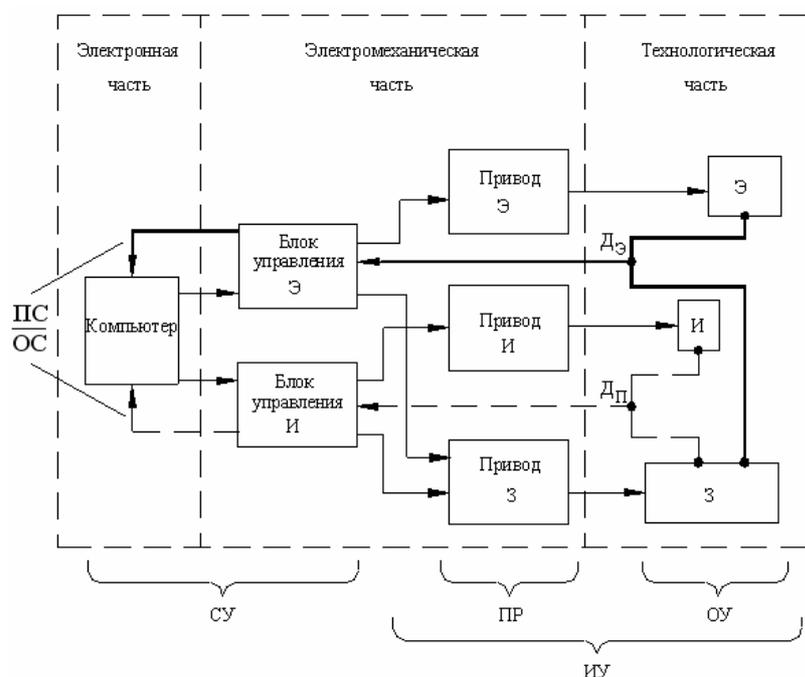


Рис. 2. Структурная схема мехатронной системы: З – заготовка; И – инструмент; Э – концентрированный источник энергии; Дп – датчик перемещений; Дэ – датчик интенсивности потока энергии; СУ – система управления; ПР – приводы; ОУ – объект управления; ИУ – исполнительные устройства; ПС – прямая связь; ОС – обратная связь

Следовательно, важную роль в обеспечении многофункциональной работы мехатронной системы играют алгоритмические и программные средства. В результате структурная схема любого гибкого производственного модуля, использующего концентрированные источники энергии, должна иметь рассмотренные элементы, чтобы обеспечить модулю длительное время устойчивой работы в автономном режиме, используя минимальное количество управляющих воздействий от пространственно удаленных подразделений виртуального предприятия.

**Системы управления процессами высокоэффективной обработки.** Рассмотрим структуру ТК термомеханической обработки деталей в электромагнитном поле. В соответствии с используемыми электромагнитными и термомеханическими потоками ТК конструктивно подразделяется на электрическую и механическую составляющие, а также систему управления. Обобщенная схема ТК (рис. 2) содержит все необходимые составляющие мехатронной системы: объекты управления, приводы,

датчики, управляющие устройства, сопряженные между собой, и систему программного обеспечения [2, 3].

При электродуговой наплавке порошка в магнитном поле с поверхностным пластическим деформированием наиболее сильное воздействие на геометрические, физико-механические параметры качества поверхности оказывают сила тока  $I$  электрических разрядов и сила давления  $P$  деформирующего элемента.

Термодинамические неустойчивости, возникающие при наплавке и деформировании поверхности и изменяющие структуру наплавленных слоев, их микротвердость, геометрические показатели, ликвидируются посредством регулирования и стабилизации параметров  $I$  и  $P$ .

Современным направлением повышения устойчивости технологических систем является оснащение их средствами адаптации. Для технологических процессов термомеханического упрочнения и восстановления деталей такое решение позволяет стабилизировать температурные и силовые параметры, то есть осуществлять управление термическими и механическими воздействиями.

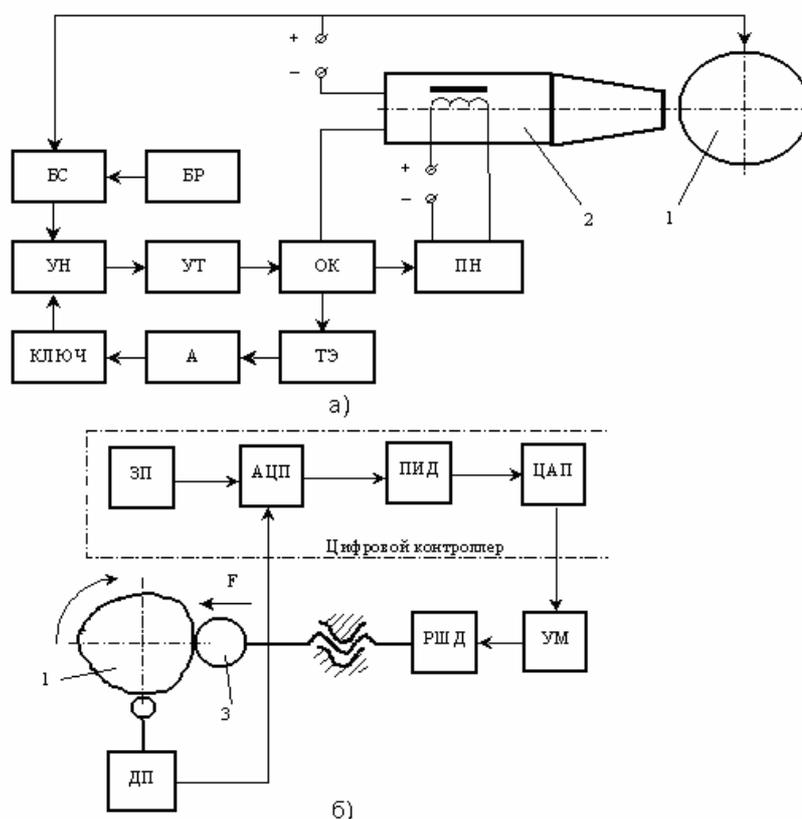


Рис. 3. Структурные схемы систем управления величиной разрядного тока  $I$  (а) и усилием деформирования  $P$  (б): 1 – деталь, 2 – электромагнит, 3 – накатник

В качестве управляемых технологических параметров приняты величина тока  $I$ , определяющая тепловое состояние зоны упрочнения, и усилие пластического деформирования  $P$ , определяющее напряженное состояние поверхностного слоя [3, 4].

Применение для контроля силы тока измерительных систем с использованием электромагнитных датчиков затруднено тем, что неустойчивость процессов в электрической дуге создает мощные электромагнитные помехи, дополняющиеся наличием паров металла, тепловым и световым излучениями. Поэтому схема адаптивного управления (рис. 3, а) использует в качестве датчика параметры электрической дуги, сигнал от которой поступает в блок сравнения (БС), сравнивается

с сигналом от блока расчета (БР). Разность этих значений преобразуется усилителями напряжения (УН) и тока (УТ) и обрабатывается оконечным каскадом (ОК), далее интегрированное значение тока выдается на преобразователь напряжения (ПН) в обмотках электромагнитной системы.

При этом ОК обеспечивает заданный уровень мощности, сравнивает текущее состояние с предыдущим, не реагируя на импульсный характер тока электрического разряда. При коротких замыканиях система защиты (тепловой элемент (ТЭ) – адаптер (А) – КЛЮЧ) отключает внешнее магнитное поле, и процесс наплавки прерывается до устранения короткого замыкания. Совмещение точки измерения непосредственно с зоной термического воздействия повышает точность и надежность системы управления.

Система автоматического управления усилием деформирования Р (рис. 3, б) состоит из датчика положения (ДП), блока задания положения (ЗП), контроллера с аналого-цифровым (АЦП) и цифро-аналоговым (ЦАП) преобразователями, пропорционально – интегрально – дифференциального регулятора (ПИД), усилителя мощности (УМ) и реверсивного шагового двигателя (РШД).

При управлении производственными процессами широко используется пропорционально – интегрально – дифференциальный закон регулирования. Аналоговая форма алгоритма имеет вид

$$y(t) = kx(t) + \frac{k}{T_1} \int_0^t x(t) dt + kT_2 \frac{dx}{dt}, \quad x(t) = u(t) - c(t),$$

где  $u(t)$  – управляющее воздействие, подаваемое с регулятора на объект управления;  $c(t)$  – требуемый выходной сигнал объекта;  $k$  – коэффициент усиления;  $T_1$  – постоянная времени интегрального регулирования;  $T_2$  – постоянная времени дифференциального регулирования.

Используя в уравнении упрощенные выражения

$$\frac{dx(t)}{dt} \approx \frac{x_n - x_{n-1}}{\Delta t};$$

$$\int_0^t x(t) dt \approx \int_0^{t-\Delta t} x(t) dt + \frac{x_n + x_{n-1}}{2} \Delta t$$

и соотношение

$$\int_0^{t-\Delta t} x(t) dt = \frac{T_1}{k} \left[ y_{n-1} - kx_{n-1} - kT_2 \frac{x_{n-1} - x_{n-2}}{\Delta t} \right],$$

получаем пропорционально – интегрально – дифференциальный закон регулирования в разностной форме:

$$y_n = y_{n-1} + k_1 x_n - k_2 x_{n-2} + k_3 x_{n-2};$$

где

$$k_1 = k \left( 1 + \frac{\Delta t}{2T_1} + \frac{T_2}{\Delta t} \right); \quad k_2 = k \left( 1 - \frac{\Delta t}{2T_1} + \frac{2T_2}{\Delta t} \right); \quad k_3 = k \frac{T_2}{\Delta t}.$$

Ввод значения  $x_n$  осуществляется микропроцессором с аналого-цифрового преобразователя побайтно. После ввода каждого нового значения необходимо записать его в запоминающее устройство, вычислить управляющее воздействие  $y_n$  и выдать его на цифро-аналоговый преобразователь, переместить величину  $x_n$  на место  $x_{n-1}$ , а  $x_{n-1}$  на место  $x_{n-2}$ . Величина  $y_n$  помещается на место  $y_{n-1}$ . После этого микропроцессор готов к

вводу нового значения  $x_n$ .

При вращении упрочняемой детали датчик положения, попадая на неровность, выдает аналоговый сигнал, амплитуда которого находится в пропорциональной зависимости от высоты неровности. Этот сигнал преобразуется в цифровую форму в виде разности значения текущего и предыдущего опроса, сравнивается с сигналом блока задания положения и поступает в ПИД-регулятор. Реакцией регулятора на входное воздействие является угол поворота вала шагового двигателя, преобразующийся через винтовую пару в линейное перемещение деформирующего элемента. При этом дифференциальная составляющая обеспечивает моментальную выборку всех люфтов и зазоров в системе привода, а интегральная – плавное изменение величины усилия поджима деформирующего элемента.

С помощью коэффициентов имеется возможность точно настраивать регулятор на текущий технологический процесс. Выходная величина с регулятора преобразуется в аналоговый вид. Усилитель тока преобразует изменение входного напряжения в силовой сигнал, достаточный для поворота вала шагового двигателя на рассчитанный угол.

**Оптимальные режимы и рациональные маршруты высокоэффективной обработки.** Анализ комбинированных термомеханических и электромагнитных процессов формирования поверхностного слоя с позиций технологического наследования геометрических показателей качества поверхности дал возможность рекомендовать оптимальные режимы (табл. 1) и рациональные маршруты операций процесса обработки на ТК [2 - 4].

В случае, когда необходимо обеспечить шероховатость поверхности Ra3.2...6.3 мкм, предлагается электромагнитная наплавка ферропорошка с поверхностным пластическим деформированием при твердости покрытия до 55HRC. Если твердость превышает 55 HRC, то необходимо ротационное упрочняющее резание с электродуговым нагревом.

В случае, когда требуется шероховатость Ra0,08...0,10 мкм, перед магнитно-абразивным полированием необходимо алмазное шлифование до Ra 1,25 мкм. Если нужна шероховатость Ra 0,4...0,8 мкм, то после нанесения покрытия достаточно операций абразивного шлифования и магнитно-абразивного полирования.

Поскольку для деталей автотракторной техники и сельхозоборудования достаточно обеспечивать шероховатость рабочих поверхностей Ra 0,4...0,8 мкм, для ТК рекомендован следующий набор технологических операций: электромагнитная наплавка с поверхностным пластическим деформированием, ротационное резание с электродуговым нагревом, абразивное шлифование и магнитно-абразивное полирование.

Предложенная структура мехатронного комплекса, разработанные системы управления процессами, рациональные маршруты и оптимальные режимы высокоэффективных методов обработки деталей (табл. 1) позволили спроектировать мехатронный ТК.

Поскольку для деталей автотракторной техники и сельхозоборудования достаточно обеспечивать шероховатость рабочих поверхностей Ra 0,4...0,8 мкм, для ТК рекомендован следующий набор технологических операций: электромагнитная наплавка с поверхностным пластическим деформированием, ротационное резание с электродуговым нагревом, абразивное шлифование и магнитно-абразивное полирование.

Предложенная структура мехатронного комплекса, разработанные системы управления процессами, рациональные маршруты и оптимальные режимы

высокоэффективных методов обработки деталей (табл. 1) позволили спроектировать мехатронный ТК.

Таблица 1 - Качество поверхностного слоя деталей с покрытиями при оптимальных режимах в процессах высокоэффективной обработки

Покрытия	Технологические факторы							Параметры качества				
	$v$ , м/с	$S$ , об/мин *( $A$ , мм)	$I$ , А	$L$ , мм *( $\tau$ , с)	$B$ , Тл	$t$ , мм *( $\delta$ , мм)	$P$ , Н	$K$ *( $Q$ , г/дм <sup>2</sup> )	$S_m$ , мм	$R_a$ , мкм	HRC	$\delta_n$ , % *( $\epsilon_0$ )
Электродуговая наплавка с упрочняющим ротационным резанием												
65Г	0,01	4,00	150	9	-	1,0	-	0,77	3,8	9,5	53,6	8,2
30ХГСА	0,01	4,00	150	12	-	1,0	-	0,72	4,00	9,8	50,2	7,6
Электромагнитная наплавка с поверхностным пластическим деформированием												
Fe-V	0,08	0,32	110	-	1,1	-	1400	0,80*	-	6,3	51,2	1,74
Fe-Ti	0,08	0,82	140	-	0,8	-	1250	1,25*	-	6,9	54,0	-
P6M5K5	0,08	0,32	100	-	0,8	-	1350	0,51*	-	6,2	50,7	-
Магнитно-абразивное полирование												
P6M5K5	3,0	1,2*	-	70*	1,2	1,1	-	1,10*	-	0,07	-	-

где  $v$  - скорость главного движения,  $S$  - скорость подачи,  $A$  - амплитуда осцилляций,  $I$  - сила тока,  $L$  - расстояние от пятна нагрева до инструмента,  $\tau$  - время обработки,  $B$  - магнитная индукция,  $t$  - глубина слоя,  $\delta$  - величина рабочего зазора,  $P$  - сила давления,  $K$  - отношение скоростей дополнительного и главного движения,  $Q$  - удельная производительность обработки,  $S_m$  - средний шаг неровностей,  $R_a$  - среднеарифметическое отклонение профиля, HRC - твердость по Роквеллу,  $\delta_n$  - степень упрочнения поверхности,  $\epsilon_0$  - относительная износостойкость.

Использование ТК, технические характеристики которого приведены в табл. 2, для операций технологического процесса по упрочнению и восстановлению наружных

поверхностей тел вращения показало высокую эффективность в условиях мелкосерийного производства ремонтных предприятий. Применение ТК позволило уменьшить численность производственного персонала до двух-трех рабочих-операторов и повысить производительность восстановления деталей в 3-4 раза.

Таблица 2 - Технические характеристики ТК высокоэффективной обработки

Характеристики	Значения
Максимальные размеры обрабатываемой детали, мм: диаметр	200
длина	250
Максимальная скорость вращения обрабатываемой детали, м/с	3
Число электромагнитных катушек	2
Максимальный ток, А: подаваемый на катушки	6
разрядный в рабочем зазоре	180
Максимальная магнитная индукция в рабочем зазоре, Тл	1,5
Установленная мощность, кВт	3,5
Габаритные размеры, мм	1800x1450x1200
Масса, кг	1650

**Заключение.** Таким образом, на основании проведенных исследований разработана методология оптимизационного синтеза мехатронных технологических комплексов высокоэффективной обработки изделий, включающая: структурный синтез технологических комплексов высокоэффективной обработки; анализ адаптивного управления в мехатронных комплексах; параметрическую оптимизацию производственных процессов и средств оснащения.

Применение мехатронных технологических комплексов в условиях мелкосерийного производства позволяет существенно повысить производительность благодаря использованию комбинированных методов обработки и автоматизации производства, как с технологическим, так и с предметным принципом организации; которая может радикально изменяться путем гибкой переналадки и адаптивного управления.

**Список литературы:** 1. Мехатроника / Т. Исии [и др.]; пер. с яп. С.Л. Масленникова; под ред. В.В. Василькова. – М.: Мир, 1988. – 314 с. 2. Ящерицын, П.И. Основы проектирования технологических комплексов в машиностроении / П.И.Ящерицын, Л.М. Акулович, М.Л.Хейфец. – Минск: Технопринт, 2006. – 248 с. 3. Хейфец, М.Л. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов / М.Л. Хейфец, Л.М. Акулович, Е.З. Зевелева. – Новополоцк: ПГУ, 2006. – 172 с. 4. Интеллектуальное производство: состояние и перспективы развития / под общ. ред. М.Л. Хейфеца и Б.П. Чемисова. – Новополоцк: ПГУ, 2002. – 268 с. 5. Информационные технологии в наукоемком машиностроении: компьютерное обеспечение индустриального бизнеса / под общ. ред. А. Г. Братухина. – Киев: Техника, 2001. – 728 с. 6. Компьютеризированные интегрированные производства и CALS-технологии в машиностроении / под ред. Б. И. Черпакова. – М.: ГУП «ВИМИ», 1999. – 512 с. 7. Бусленко, Н. П. Математическое моделирование производственных процессов / Н. П. Бусленко. - М.: Наука, 1964. - 314 с. 8. Артоболевский, И.И. Основы синтеза систем машин автоматического действия / И.И.Артоболевский, Д.Я. Ильинский. – М.: Наука, 1983. – 280 с.