

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.01/621.81

doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-12-25

ИНСТРУМЕНТЫ РАЗРАБОТКИ КОНСТРУКЦИЙ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Владимир Михайлович Третьяков

Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева, г. Ковров,
Россия

tretyakov.kovrov@list.ru

Аннотация. Для повышения конкурентоспособности отечественного машиностроения, уменьшения избыточного разнообразия составных частей изделий и компонентов производства, а также для решения задач, связанных с цифровизацией производства, нужны новые эффективные бизнес-процессы создания продукции. Повышение качества, технологичности, эффективности эксплуатации изделий зависит от совершенства их конструкций. Для решения задач конструирования предлагаются три основных инструмента: узлы сопряжения, матрицы подвижностей и промежутки между составными частями изделия. Применение этих инструментов в рамках метода группового проектирования позволяет разрабатывать кастомизированные изделия с низкими затратами на производство единицы продукции и будет способствовать решению задачи цифровой трансформации бизнес процессов. Являясь самыми общими понятиями, отражающими то, что присуще любым изделиям, предложенные инструменты позволяют приблизиться к решению задачи формализации процесса «придумывания» конструкции. Применение предложенных инструментов иллюстрируется на примере модернизации конструкции подвижного соединения. В исходном изделии подвижная составная часть должна быть заменена на составную часть другой конструкции. В результате выполнения проектной работы установлено, что для этого необходимо ввести дополнительную составную часть и провести разработку ее конструкции.

Ключевые слова: конструирование, узел сопряжения, матрица подвижностей, структурная модель, семейство изделий, цифровое производство

Для цитирования: Третьяков В.М. Инструменты разработки конструкций изделий машиностроения // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2025. №2 (28). С. 12-25. doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-12-25.

Original article

Open Access Article

TOOLS FOR DEVELOPING MECHANICAL ENGINEERING PRODUCT DESIGN

Vladimir M. Tretyakov

Kovrov State Technological Academy of Degtyarev, Kovrov, Russia

tretyakov.kovrov@list.ru

Abstract. To enhance the competitiveness of domestic machinery mechanical engineering, to reduce excessive diversity in component parts and production components, as well as to address challenges related to digital transformation of production processes, new efficient business processes for product creation are required. Improving quality, technological sophistication, and operational efficiency of the parts depends on their design perfection. To solve design tasks, the author proposes three main tools namely coupling nodes, mobility matrices, and gaps between component parts of a product. Using these tools within the framework of group design methodology allows developing customized products with low costs per unit produced and will contribute to solving the task of digitizing business processes. Being the most general concepts that reflect what is inherent in any product, the proposed tools can help formalize the process of “inventing” a construction. The paper illustrates applying the proposed tools by an example of modernizing the design of a movable connection. In the original product, a moving part must be replaced with another type of structure. As a result of the project work, it is established that this requires introducing an additional component and designing its structure.

Keywords: design, coupling node, mobility matrix, structural model, family of products, digital production

For citation: Tretyakov V.M. Tools for Developing Mechanical Engineering Product Design. Automation and modeling in design and management, 2025, no. 2 (28). pp. 12-25. doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-12-25.

Введение

Отечественное машиностроение характеризуется ростом избыточного разнообразия составных частей (СЧ) выпускаемых изделий, технологических процессов, средств технологического обеспечения [1]. Для уменьшения избыточности широко применяются методы унификации, групповые и типовые технологические процессы. Эффективность этих инструментов не достаточна для решения задачи обеспечения конкурентоспособности отечественного машиностроения [1]. Кроме того, в настоящее время основным трендом совершенствования промышленного производства считается его цифровая трансформация [2]. Россия отстает в сфере важнейших научноемких технологий с постепенной потерей основ конкурентоспособности [3].

В [4 – 6] для уменьшения избыточного разнообразия изделий и компонентов производства, а также для решения задач, связанных с цифровизацией, предлагается представлять изделия структурированным множеством модулей. Конструкция изделия (КИ) представляется в виде системы модулей групп деталей. Для детали используется описание в виде системы модулей поверхностей (МП). Если все детали изделия «... заместить совокупностями МП, то КИ можно представить множеством МП». Для описания модульного строения КИ используется граф иерархической структуры [4]. Данный подход может служить целям уменьшения разнообразия компонентов производства и одним из направлений совершенствования их описания с целью повышения эффективности цифровой модернизации. Модули поверхностей, приведенные в [1], выделены из геометрии СЧ с позиций технологии их изготовления. Они не приспособлены к формированию новой конструкции.

Неуправляемый рост избыточности связан с тем, что управлять ей обычно начинают только после разработки изделий. Об этом говорил профессор Н.Г. Домбровский в работе [7]. В [8] отмечено, что повышение технологичности, ремонтопригодности и уровня унификации машин зависит от совершенства структуры изделия, которая в значительной мере, предопределется методами конструирования. Таким образом, возможности эффективного управления разнообразием изделий, их СЧ и средств технологического обеспечения закладываются в КИ на этапе разработки. Используемый при этом метод конструирования должен позволять разрабатывать кастомизированные изделия с низкими затратами на производство единицы продукции и соответствовать задачам цифровой трансформации. Целью данной статьи является рассмотрение основных инструментов конструирования, которые позволяют приблизиться к решению «главной задачи конструктора при внутреннем проектировании – придумать конструкцию» [9].

Материалы и методы

Метод группового проектирования изделий. Метод разработки семейств унифицированных изделий появился как средство решения задачи унификации выпускаемой продукции [10 – 14] под названием групповое проектирование изделий [15]. Он используется и под другими наименованиями: метод агрегатирования [7, 14], метод базового изделия [10], модульное конструирование [10 – 13], проектирование семейств изделий (*product family engineering*). Число форм проявления группового проектирования продолжает увеличиваться, например, в лице «платформенно-модульного подхода» к разработке робототехнических комплексов [16]. Распространение группового подхода не только на производство и проектирование, но и остальные этапы жизненного цикла изделий привело к пониманию неизбежности появления групповой технологии создания семейств изделий [17]. Зарубежные коллеги существенно опережают нас в ее применении [18].

Объектом группового проектирования является группа, семейство изделий. В результате проектирования создается унифицированная элементная база (ЭБ) составных частей изделий и методика синтеза на ее основе конечной продукции. Элементная база семейства имеет минимальную номенклатуру СЧ, обеспечивающую требуемое разнообразие конечной продукции. Одним из основных признаков, позволяющих установить является ли группа

однородной продукции семейством, служит сходство их СЧ. В [19] предложено считать, что группа изделий является семейством, если они состоят из унифицированных СЧ.

Приспособленность компонента ЭБ к многократному применению в разных изделиях семейства, в том числе и в соединении с разными СЧ, обусловлена особенностями той части его конструкции, которой он обменивается потоками энергии, вещества и сигналов с присоединенным к нему объектом. Эта часть конструкции компонента в [20] названа элементом сопряжения, а позднее получила название узла сопряжения. Узел сопряжения – базовое конструкторское понятие. Совокупность узлов сопряжения – основа для формирования КИ. Выделение узла сопряжения, как первичного элемента конструкции, позволяет определить основные причины избыточного разнообразия СЧ [19], строить структурные модели, более точно отражающие строение изделий, решать задачи структурного синтеза [21], создавать КИ [19]. Понятие узел сопряжения используется не только при разработке одного или группы изделий, но и при проектировании фрагментов СЧ. В работе [22] показан пример использования узлов сопряжения при конструировании кинематических пар, при этом, кроме понятия узел сопряжения, использовались матрицы подвижностей кинематических пар. Таким образом, при использовании группового проектирования удалось выявить основу любой конструкции в лице узла сопряжения. В дополнении к этому теория механизмов и машин предоставила конструктору еще один инструмент разработки – матрицу подвижностей.

Основные инструменты конструирования

Первый этап процесса разработки технического устройства заключается в определении его принципа действия, второй – связан с созданием КИ. Для механизмов и машин принцип действия принято оформлять в виде кинематической схемы.

Основные инструменты, которые используются при разработке изделий машиностроения:

1. Матрицы подвижностей, структурные уравнения в матричной и алгебраической форме.

Структурное уравнение в матричной форме, приведенное в [23], имеет вид:

$$WQ_m = W_{m-1} + W_{M(m-1)}^u + H_{\Sigma m} - W_{Mm}^u - W_{Mm} - F, \quad (1)$$

где WQ_m – матрица структурных свойств (подвижностей и избыточных связей) кинематической цепи, полученной формированием m -го замкнутого контура, она содержит описание подвижностей всего механизма, полученного замыканием всех контуров начиная с первого, включая контур с номером m , и избыточных связей, возникших только в контуре под номером m ; W_{m-1} – матрица общих подвижностей начального механизма, входящего в замкнутый контур под номером m , которая содержит подвижности всего начального механизма, полученного замыканием всех контуров начиная с первого, включая и контур с номером $(m-1)$; $H_{\Sigma m} = \sum_{i=1}^{p^m} H_i$ – суммарная матрица подвижностей в кинематических парах, образованных вновь введенными СЧ при формировании замкнутого контура под номером m ;

$H_i = \begin{vmatrix} t_x & r_x \\ t_y & r_y \\ t_z & r_z \end{vmatrix}$ – матрица подвижностей i -ой кинематической пары, где t_x, t_y, t_z – переменные,

равные 1 при наличии поступательных подвижностей (движений) вдоль осей X, Y, Z и 0 в противном случае; r_x, r_y, r_z – переменные, принимающие значение 1 при наличии вращательных подвижностей (движений) вокруг осей X, Y, Z и значение 0 в противном случае; $p^m = p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5$ – число кинематических пар, образованных вновь введенными СЧ при формировании замкнутого контура под номером m , где p_1, p_2, p_3, p_4, p_5 – число кинематических пар разных классов; $W_{M(m-1)}^u$ – матрица местных подвижностей в составе начального механизма СЧ u , к которой будут присоединены СЧ, вновь вводимые при

формировании m -го замкнутого контура механизма; W_{Mm}^u – матрица местных подвижностей СЧ u , к которой присоединены СЧ, введенные при формировании m -го замкнутого контура механизма (при образовании замкнутого контура таких СЧ может быть две); $W_{Mm} = \sum_{j=1}^{n_m} W_{Mj}$ – суммарная матрица местных подвижностей СЧ, вновь введенных при

формировании m -го замкнутого контура механизма; $W_{Mj} = \begin{vmatrix} w_M^{tx} & w_M^{rx} \\ w_M^{ty} & w_M^{ry} \\ w_M^{tz} & w_M^{rz} \end{vmatrix}$ – матрица местных подвижностей j -ой СЧ, где $w_M^{tx}, w_M^{ty}, w_M^{tz}$ – переменные, принимающие значение 1 при наличии независимых поступательных движений j -ой СЧ вдоль осей X, Y, Z и значение 0 в противном случае; $w_M^{rx}, w_M^{ry}, w_M^{rz}$ – переменные, принимающие значение 1 при наличии независимых вращательных движений j -ой СЧ вокруг осей X, Y, Z и значение 0 в противном случае; n_m – число подвижных СЧ вновь введенных при формировании m -го замкнутого

контура механизма; $F = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix}$ – единичная матрица свободного замыкания контура (матрица

подвижностей свободного твердого тела); $k = p - n$ – число независимых замкнутых контуров механизма, как разность общего числа его кинематических пар (p) и числа подвижных СЧ (n).

2. Узлы сопряжения составной части, и производные от них объекты: узел сопряжения – совокупность фрагментов (точек, линий, поверхностей) СЧ, используемых для обмена материальными потоками с другим объектом при заданном их относительном положении (узлы сопряжения на взаимодействующих СЧ идентичны, рис. 1); геометрический элемент СЧ представляет собой геометрическое место всех положений узла сопряжения на ее поверхности, он формируется на основе узла сопряжения с использованием матрицы подвижностей [22], фрагмент геометрического тела СЧ, получаемый «наращиванием» толщины геометрического элемента достаточной для обеспечения требуемой прочности и жесткости создаваемого соединения; основные параметры геометрии узла сопряжения и геометрического элемента; структурные модели (графические и аналитические, см. рис. 1), учитывающие узлы сопряжения (геометрические элементы).

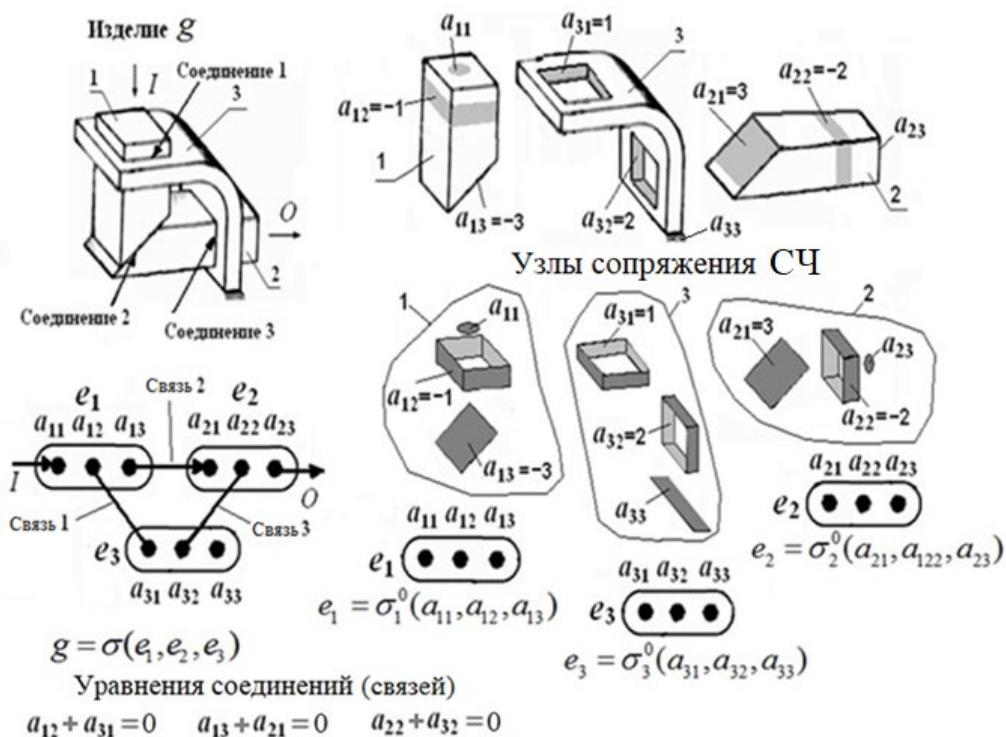


Рис. 1. Изделие $g = \sigma(e_1, e_2, e_3)$, его СЧ и модели, учитывающие узлы сопряжения
Fig. 1. Product $g = \sigma(e_1, e_2, e_3)$, its SCH and models taking into account the mating nodes

Состав изделия представляет собой множество входящих в него СЧ: состав (g) = $\{e_1, e_2, \dots, e_n\}$. Связи изделия – это множество соединений (σ -соединитель), существующих между узлами сопряжения его СЧ: связи (g) = σ . Соединитель представляет собой граф связей вершин, соответствующих узлам сопряжения, и может быть представлен графически (см. рис. 1), матрицей смежности вершин графа (табл. 1), матрицей инцидентности вершин и ребер.

Таблица 1

Состав и соединитель изделия $g = \sigma(e_1, e_2, e_3)$ (рис. 1)

Table 1

Composition and connector of the product $g = \sigma(e_1, e_2, e_3)$ (fig. 1)

состав(g) = $\{e_1, e_2, e_3\}$	СЧ изделия			e_1			e_2			e_3			$= \sigma$
	Узлы сопряжения			a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{31}	a_{32}	a_{33}	
	Исполнения узлов			-1	-3	3	-2			1	2		
$g = \sigma(e_1, e_2, e_3)$	e_1	a_{11}		0	0	0	0	0	0	0	0	0	$= \sigma$
		a_{12}	-1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
		a_{13}	-3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
	e_2	a_{21}	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
		a_{22}	-2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
		a_{23}		0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	e_3	a_{31}	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
		a_{32}	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
		a_{33}		0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Изделие может быть представлено алгебраическим выражением вида: $g = \sigma(e_1, e_2, \dots, e_n)$. По аналогии с изделием устройство составной части может быть показано, как конструкция, содержащая узлы сопряжения (геометрические элементы): $e = \sigma^0(a_1, a_2, \dots, a_r)$, где соединитель σ^0 представляет собой пустой граф, не имеющий ребер (рис. 1, табл. 1).

В качестве показателя исполнения узла (геометрического элемента) используется число или буквенный символ K : $a_{ij} = K$ (уравнение исполнения узла сопряжения). Знак показателя исполнения определяется охватываемой (обозначается « $-K$ ») или охватывающей (« $+K$ » или « K ») геометрией узла сопряжения или директивно. Узлы, обозначенные разными показателями K , отличаются геометрией. Для соединяемых узлов сопряжения выполняется уравнение соединения:

$$a_{ij} + a_{kl} = 0, \quad (2)$$

где в обозначении узла a_{ij} первый индекс, например, i – показывает номер СЧ, которой принадлежит данный узел, а второй индекс j – номер узла в составе ее узлов или номер СЧ присоединенной к этому узлу. Возможно только попарное соединение узлов сопряжения. Также используются уравнения унификации узлов: $a_{ij} - a_{kp} = 0$.

Единицы в табл. 1 показывают взаимодействующие узлы СЧ, для которых выполняется уравнение соединения (2).

3. Модели промежутков между СЧ изделия. Способ моделирования изделий в компьютерных системах с использованием создания компьютерных моделей требуемых промежутков между СЧ изделия предложен в [24]. Основное назначение промежутков – формирование фрагментов конструкции, которые не могут быть определены узлами сопряжения.

Результаты

Упоминаемые выше инструменты конструирования использовались автором для решения различных конструкторских задач. Узлы сопряжения и структурные модели применялись для разработки семейств изделий [19] и конструирования отдельных деталей [25]. Матрицы подвижностей – для корректировки кинематических схем механизмов с целью

устранения избыточных связей [23, 26]. В данной работе инструменты используются для модернизации конструкции подвижного соединения (рис. 2) СЧ1, СЧ2 и СЧ3 (ось). Пример максимально упрощенный. В рассматриваемом примере узел сопряжения и полученный на его основе геометрический элемент совпадают, так как совпадает их геометрия. Это касается узлов сопряжения, осуществляющих взаимодействие СЧ друг с другом. На рисунках штриховыми линиями выделены узлы сопряжения (геометрические элементы) СЧ. Для упрощения рисунков в обозначениях СЧ и их узлов сопряжения опущены буквы, а используются, в основном, цифровые индексы. Буквами «П» обозначены модели промежутков. Промежутки разных СЧ могут пересекаться между собой. Узлы сопряжения a_{1i} и a_{2j} на рисунках не показаны.

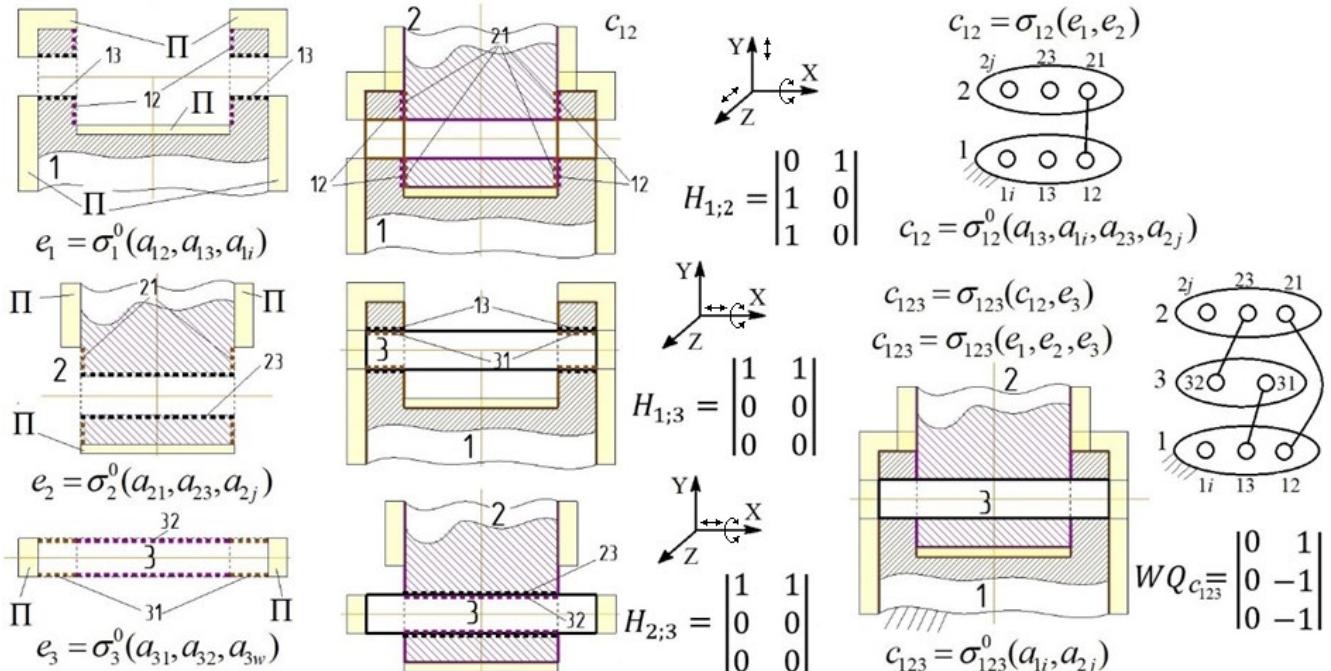


Рис. 2. Подвижное соединение, СЧ, узлы сопряжения, промежутки между СЧ
Fig. 2. Movable joint, SCH, mating nodes, gaps between SCH

Модели составных частей подвижного соединения, приведенного на рис. 2.

	Состав (e_1)	$a_{12} = 1$ Плоскости (Пл)	$a_{13} = 2$ Цилиндр (Ц)	$a_{1i} = m$	Узлы (виды узлов)
$e_1 = \sigma_1^0(a_{12}, a_{13}, a_{1i}) =$	$a_{12} = 1$	0	0	0	$= \sigma_1^0$
	$a_{13} = 2$	0	0	0	
	$a_{1i} = m$	0	0	0	
$e_2 = \sigma_2^0(a_{21}, a_{23}, a_{2j}) =$	Состав(e_2)	$a_{21} = -1$ Пл	$a_{23} = 3$ Ц	$a_{2j} = n$	Узлы
	$a_{21} = -1$	0	0	0	$= \sigma_2^0$
	$a_{23} = 3$	0	0	0	
	$a_{2j} = n$	0	0	0	
$e_3 = \sigma_3^0(a_{31}, a_{32}) =$	Состав(e_3)	$a_{31} = -2$ Ц	$a_{32} = -3$ Ц		Узлы
	$a_{31} = -2$	0	0		$= \sigma_3^0$
	$a_{32} = -3$	0	0		

Определение соединителя и узлов сопряжения сборочных единиц

Соединяя e_1 и e_2 получаем сборочную единицу c_{12} (см. рис. 2): $c_{12} = \sigma_{12}(e_1, e_2) = \sigma_{12}(\sigma_1^0(a_{12}, a_{13}, a_{1i}), \sigma_2^0(a_{21}, a_{23}, a_{2j}))$. Состав (c_{12}) = Состав (e_1) \cup Состав (e_2). Таблицы соединяемых СЧ объединяются в одну. Полученная расширенная таблица 2 первоначально заполняется нолями. Соединитель сборочной единицы $c_{12} = \sigma_{12}(e_1, e_2)$ получается путем заполнения единицами ячеек, определяемых узлами сопряжения, образующими соединения. Для этих узлов выполняется уравнение сборки (2). Вид уравнения: $a_{12} + a_{21} = 0$. В нашем случае это две ячейки, расположенные симметрично относительно главной диагонали таблицы.

Таблица 2

Состав узлов сопряжения и соединитель сборочной единицы c_{12}

Table 2

Composition of mating units and connector of assembly unit c_{12}

Состав (c_{12})	$a_{12} = 1$	$a_{13} = 2$	$a_{1i} = m$	$a_{21} = -1$	$a_{23} = 3$	$a_{2j} = n$	Узлы
$a_{12} = 1$	0	0	0	1	0	0	$= \sigma_{12}$
$a_{13} = 2$	0	0	0	0	0	0	
$a_{1i} = m$	0	0	0	0	0	0	
$a_{21} = -1$	1	0	0	0	0	0	
$a_{23} = 3$	0	0	0	0	0	0	
$a_{2j} = n$	0	0	0	0	0	0	

Узлы сопряжения (a_{12} и a_{21}), которые использованы для соединения СЧ (e_1 и e_2), больше не могут применяться для образования соединений. Удаляя из таблицы строки и столбцы, соответствующие ячейкам, в которых расположены единицы, получаем описание $c_{12} = \sigma_{12}(e_1, e_2)$ как компонента системы верхнего уровня, состоящего из узлов сопряжения $c_{12} = \sigma_{12}^0(a_{13}, a_{1i}, a_{23}, a_{2j})$ (табл. 3).

Таблица 3

Сборочная единица c_{12} как черный ящик

Table 3

Assembly unit c_{12} as a black box

Состав(c_{12})	$a_{13} = 2$	$a_{1i} = m$	$a_{23} = 3$	$a_{2j} = n$	Узлы
$a_{13} = 2$	0	0	0	0	$= \sigma_{12}^0$
$a_{1i} = m$	0	0	0	0	
$a_{23} = 3$	0	0	0	0	
$a_{2j} = n$	0	0	0	0	

Соединив c_{12} и e_3 (СЧ3) получим сборочную единицу $c_{123} = \sigma_{123}(c_{12}, e_3)$ (см. рис. 2). Состав узлов сопряжения и соединитель сборочной единицы c_{123} .

Состав(c_{123})	$a_{13} = 2$	$a_{1i} = m$	$a_{23} = 3$	$a_{2j} = n$	$a_{31} = -2$	$a_{32} = -3$	Узлы
$a_{13} = 2$	0	0	0	0	1	0	$= \sigma_{123}$
$a_{1i} = m$	0	0	0	0	0	0	
$a_{23} = 3$	0	0	0	0	0	1	
$a_{2j} = n$	0	0	0	0	0	0	
$a_{31} = -2$	1	0	0	0	0	0	
$a_{32} = -3$	0	0	1	0	0	0	

Сборочная единица $c_{123} = \sigma_{123}^0(a_{1i}, a_{2j})$, как черный ящик.

Состав(c_{123})	$a_{1i} = m$	$a_{2j} = n$	Узлы
$a_{1i} = m$	0	0	
$a_{2j} = n$	0	0	$= \sigma_{123}^0$

Корректировка кинематической схемы устройства

Определим структурные свойства сборочной единицы c_{123} . СЧ1 неподвижна, а СЧ2 – выходное звено. Матрицы подвижностей кинематических пар приведены на рис. 2. Матрица местных подвижностей СЧ3 определяется относительно «остановленных» СЧ1 и СЧ2:

$W_{M3} = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}$. Для оценки структурных свойств рассматриваемой конструкции используем уравнение (1), которое для c_{123} , показанной на рис. 2, будет иметь вид:

$$WQ_{c123} = H_{1;2} + H_{1;3} + H_{2;3} - W_{M3} - F;$$

$$WQ_{c123} = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -1 \\ 0 & -1 \end{vmatrix}. \quad (3)$$

В соответствии с данными полученной матрицы WQ_{c123} СЧ2 вращается вокруг оси X (верхняя единица второго столбца). При изготовлении необходимо жестко ограничить неперпендикулярность к оси X плоскостей соприкосновения СЧ1 и СЧ2 (две (-1) избыточные связи – отсутствие вращательных подвижностей вокруг осей Y и Z).

В прототипе c_{123} заменяем СЧ2 на СЧ2' (рис. 3), где СЧ2' $e_{2'} = \sigma_{2'}^0(a_{2's} = -5, a_{2'q} = 4, a_{2'j} = n)$. Оси симметрии СЧ1, СЧ2, СЧ2' располагаются на одной прямой. Подвижность конструкции должна сохраниться. Конструкции СЧ1, СЧ2' и СЧ3 изменять нельзя. Виды исполнений узлов сопряжения СЧ2' приведены на рис. 3. В конструкцию можно вводить только низшие кинематические пары.

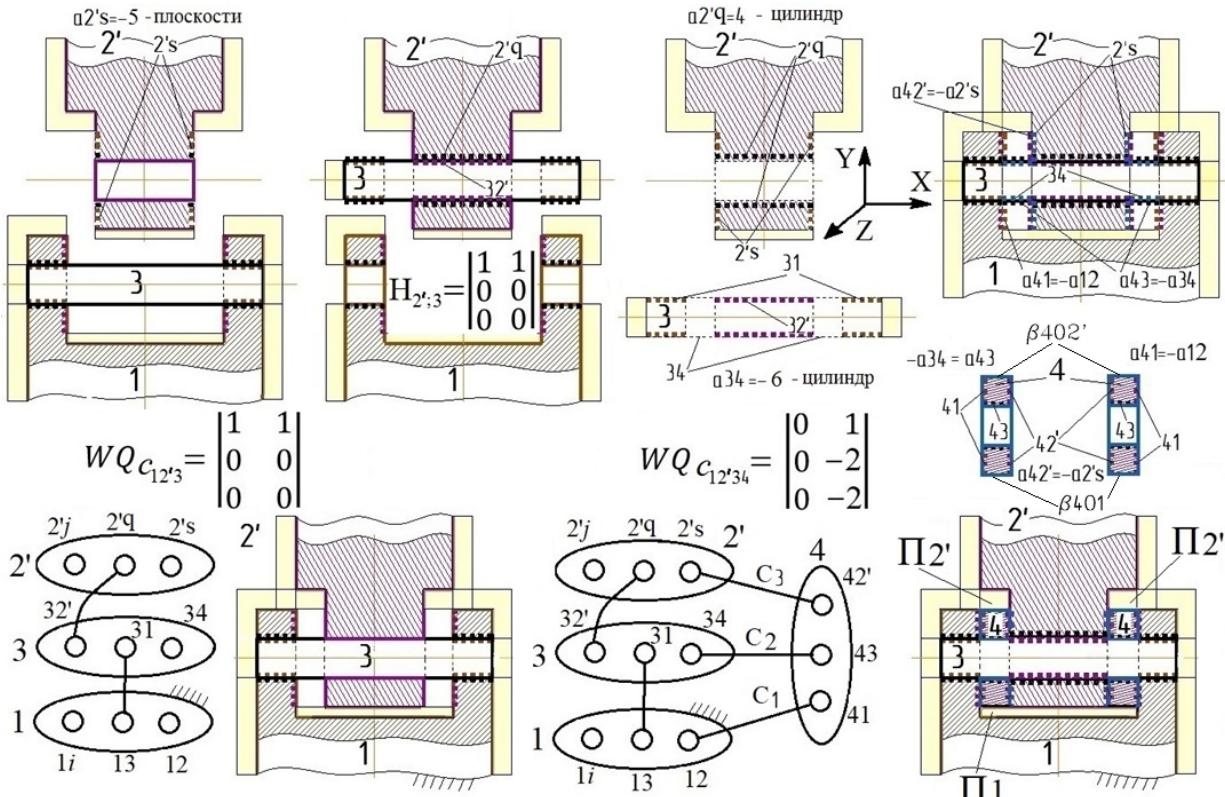


Рис. 3. Новый вариант подвижного соединения и его структурные модели
Fig. 3. New version of the movable joint and its structural models

Использование соединения $a_{2'q} + a_{32'} = 0$ определяет исполнение узла СЧ3 $a_{32'} = -a_{2'q} = -4$. С учетом отсутствия замкнутого контура у $c_{12'3}$ (левая нижняя часть см. рис. 3) ее структурные свойства определяются из выражения: $WQ_{c12'3} = H_{1;3} + H_{2';3} - W_{M3}$.

$$WQ_{c12'3} = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}.$$

Полученная сборочная единица $c_{12'3}$, кроме вращательной, имеет поступательную подвижность вдоль оси X . Поскольку изменять эти СЧ нельзя необходимо ввести новую СЧ4, которая должна исключить поступательную подвижность. Предположим, что вновь введенная СЧ4 может иметь местные подвижности и образует соединения (c_1, c_2, c_3) со всеми имеющимися в конструкции СЧ. Структурная модель такой конструкции показана в нижней части рис. 3. Для нее должно выполняться условие: $W_{c12'34} = W_{c123}$.

Узлы сопряжения СЧ3 c_{123} образуют его геометрический элемент $a_{31} \cup a_{32}$ (см. рис. 2), который используется в новой конструкции для соединения с тремя СЧ (см. рис. 3), поэтому $a_{31} \cup a_{32} = a_{31} \cup a_{32'} \cup a_{34}$. Из полученного равенства получаем узел $a_{34} = a_{32} \setminus a_{32'}$. Исполнение этого узла обозначим $a_{34} = -6$ (унаследованный цилиндр с другой длиной образующей).

В конструкции два независимых замкнутых контура. В качестве первого контура рассматриваем СЧ1, СЧ3 и СЧ4. В нем появляются два новых соединения $c_1, a_{12} + a_{41} = 0$ и $c_2, a_{34} + a_{43} = 0$, откуда $a_{41} = -a_{12} = -1, a_{43} = -a_{34} = 6$. Полученные данные заносим в табл. 4 и отмечаем единицами три соединения между СЧ сборочной единицы $c_{134} = \sigma_{134}(e_1, e_3, e_4)$.

Таблица 4
Состав и соединитель $c_{134} = \sigma_{134}(e_1, e_3, e_4)$

Table 4

Composition and connector $c_{134} = \sigma_{134}(e_1, e_3, e_4)$

Состав (e_1, e_3, e_4)	e_1			e_3			e_4			СЧ
	a_{12}	a_{13}	a_{1i}	a_{31}	$a_{32'}$	a_{34}	a_{41}	$a_{42'}$	a_{43}	
	1	2	m	-2		-6	-1		6	Узлы
Пл	Ц	-	Ц		Ц	Пл	Пл		Ц	Исполнения К
$a_{12}=1; \text{Пл}$	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
$a_{13} = 2; \text{Ц}$	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
$a_{1i}=m$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
$a_{31} = -2; \text{Ц}$	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
$a_{32'} =$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
$a_{34} = -6; \text{Ц}$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
$a_{41} = -1; \text{Пл}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
$a_{42'} =$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
$a_{43} = 6; \text{Ц}$	0	0	0	0	0	1	0	0	0	

$=\sigma_{134}$

Структурные свойства c_{134} определим по формуле: $WQ_{c134} = H_{1;4} + H_{1;3} + H_{3;4} - W_{M1}^3 - W_{M1}^4 - F$, где W_{M1}^3, W_{M1}^4 – местные подвижности СЧ3 и СЧ4 в составе первого замкнутого контура. В соответствии с табл. 4 кинематические пары,

образованные СЧ3 с СЧ1 и СЧ4 цилиндрические и $H_{1;3} = H_{3;4} = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}$, а образованные СЧ1

и СЧ4 плоскостная, поэтому $H_{1;4} = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{vmatrix}$. Виды кинематических пар определяются видами (цилиндр или плоскость) узлов сопряжения.

Определяем в первом замкнутом контуре местные подвижности СЧ3 $W_{M1}^3 = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}$ и СЧ4 $W_{M1}^4 = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}$. Для этого останавливаем сопряженные с ними СЧ. Структурные свойства первого замкнутого контура:

$$WQ_{c134} = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & -1 \end{vmatrix}. \quad (4)$$

Присоединив СЧ2' к c_{134} , получаем второй замкнутый контур и все изделие в целом. Появились еще две связи. Одна из них новая $c_3: a_{2's} + a_{42'} = 0, a_{42'} = -a_{2's} = 5$. Вторая уже определена уравнением соединения для $c_{12'3}: a_{2'q} + a_{32'} = 0, a_{32'} = -a_{2'q} = -4$. Полученные данные о исполнениях узлов заносим в табл. 5, которая получена из табл. 4 добавлением информации о присоединенной СЧ2'. В соответствии с табл. 5 кинематическая пара, образованная СЧ2' с СЧ3, цилиндрическая $H_{2';3} = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}$ (см. рис. 3), а с СЧ4 плоскостная $H_{2';4} = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{vmatrix}$. Для конструкции $c_{12'34}$ уравнение (1) будет иметь вид:

$$WQ_{c12'34} = WQ_{c134} + H_{2';3} + H_{2';4} + W_{M1}^3 + W_{M1}^4 - W_{M2}^3 - W_{M2}^4 - F.$$

С появлением второго замкнутого контура местные подвижности СЧ3 и СЧ4 не изменились:

$$W_{M3} = W_{M2}^3 = W_{M1}^3 = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}, W_{M4} = W_{M2}^4 = W_{M1}^4 = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}. \quad (5)$$

С учетом (4) и (5) получим:

$$WQ_{c12'34} = \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & -1 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{vmatrix} + W_{M3} + W_{M4} - W_{M3} - W_{M4} - \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -2 \\ 0 & -2 \end{vmatrix}.$$

Полный состав и соединитель $c_{12'34}$ приведены в табл. 5. Цветом выделена вновь добавленная СЧ4. Подвижность полученной конструкции равна подвижности прототипа (см. (3)). Число избыточных связей удвоилось, так как удвоилось число замкнутых контуров.

Остался не определенным геометрический элемент СЧ4, который «взаимодействует» с промежутками П1 и П2'. Определение узлов сопряжения СЧ4 и узлов взаимодействующих с ней промежутков П1 и П2' (рис. 4), осуществляется по вращательному движению СЧ2' вокруг оси X и ее геометрическому элементу (плоскости) подобно тому, как показано в [22]. Эти узлы $\beta_{014}, \beta_{401}, \beta_{02'4}, \beta_{402'}$ представляют собой отрезки прямой параллельные оси X . Геометрический элемент СЧ4, «взаимодействующий» с промежутками, представляет собой цилиндр, полученный в результате вращения $\beta_{02'4}$ или β_{014} вместе с СЧ2'. Выбирается тот из них, радиус вращения которого меньше. Конструкции СЧ4 и $c_{12'34}$ показаны на рис. 3.

Полный состав и соединитель $c_{12'34} = \sigma_{12'34}(e_1, e_2', e_3, e_4)$

Full composition and connector $c_{12'34} = \sigma_{12'34}(e_1, e_2', e_3, e_4)$

Таблица 5

Состав($e_1, e_{2'}, e_3, e_4$)	e_1			$e_{2'}$			e_3			e_4			CЧ
	a_{12}	a_{13}	a_{1i}	$a_{2'}s$	$a_{2'}q$	$a_{2'}j$	a_{31}	$a_{32'}$	a_{341}	a_{41}	$a_{42'}$	a_{43}	Узлы
	1	2	m	-5	4	n	-2	-4	-6	-1	5	6	K
	Пл	Ц	-	Пл	Ц	-	Ц	Ц	Ц	Пл	Пл	Ц	Виды узлов
$a_{12}=1; \text{Пл}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
$a_{13} = 2; \text{Ц}$	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
$a_{1i}=m$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
$a_{2'}s = -5; \text{Пл}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
$a_{2'}q = 4; \text{Ц}$	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
$a_{2'}j = n$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
$a_{31} = -2; \text{Ц}$	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
$a_{32'} = -4; \text{Ц}$	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
$a_{34} = -6; \text{Ц}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
$a_{41} = -1; \text{Пл}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
$a_{42'} = 5; \text{Пл}$	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
$a_{43} = 6; \text{Ц}$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	

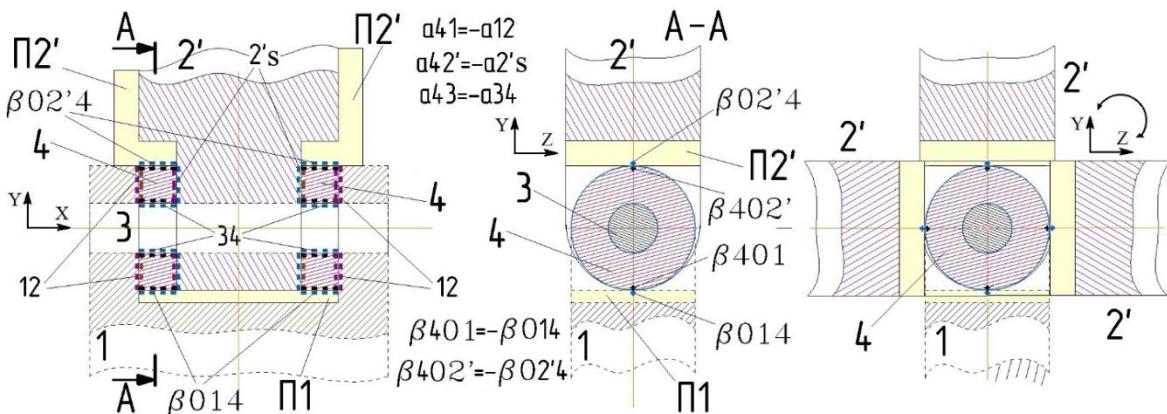


Рис. 4. Образование геометрического элемента СЧ4, «взаимодействующего» с П1 и П2'
Fig. 4. Formation of the geometric element SCH4, «interacting» with P1 and P2'.

Обсуждение

Для идентификации положения узлов на составной части e_i в [27] введено понятие координат узла сопряжения. Координаты узла a_{ip} задаются в виде пары (M_{ip}, \vec{r}_{ip}) , определяющей положение привязочной системы координат узла (в ней определена его геометрия) относительно принятой базовой системы координат, которая связана с самой СЧ. Здесь M_{ip} – матрица косинусов углов между осями привязочной и базовой систем координат составной части e_i ; \vec{r}_{ip} – радиус-вектор, определяющий положение привязочной точки привязочной системы координат в базовой системе. Координаты узлов сопряжения позволяют определить положения узлов на СЧ и сборочных единицах [27, 28]. По известным координатам узлов сопряжения и значениям сил рассчитываются силовые факторы, действующие на узлы сопряжения.

Решив задачу конструирования изделия, мы получаем модель, описывающую его геометрическую форму и размеры. Распространив понятие узел сопряжения на сформированную КИ, можно построить ее структурную модель считая компонентами отдельные поверхности (см. рис. 2 в [25]). Узлами сопряжения таких компонентов являются чисто геометрические объекты: линии, по которым пересекаются поверхности КИ.

Структурные модели данного типа являются моделями второго уровня по сравнению с моделями первого уровня, в которых узлы сопряжения являются не только геометрическими, но и физическими объектами, передающими потоки энергии, вещества и сигналов. Имея модели второго уровня можно перейти к моделям первого уровня, в которых узлы сопряжения определяются не с точки зрения решения конструкторских задач, а для других целей, например, технологических.

Применяя понятие узел сопряжения в процессе конструирования необходимо создавать банки исполнений узлов сопряжения и геометрических элементов с целью их унификации для семейств и групп однородной продукции. Избыточное разнообразие исполнений узлов сопряжения одна из основных причин избыточного разнообразия СЧ и компонентов производства.

Выводы

1. Узел сопряжения – базовое конструкторское понятие. Узлы сопряжения могут быть учтены в структурных моделях на любом уровне разукрупнения проектируемого, изготавливаемого, находящегося в эксплуатации или изучаемого объекта: от системы, рассматриваемой как черный ящик, до наличия полной геометрии всех его СЧ.

2. Структурные модели, учитывающие узлы сопряжения, легко трансформируются в более простые путем слияния вершин, соответствующих узлам сопряжения одной СЧ, в одну вершину, представляющую в модели данную СЧ. Это позволяет применять уже освоенные методы, например, при разработке процессов сборки [29].

3. Матрицы подвижностей и структурные уравнения позволяют определить возможные принципы действия механизма и их модификации, а также число СЧ и виды соединений.

4. Совместное применение узлов сопряжения и матриц подвижностей позволяет сформировать геометрические элементы, являющиеся главной составляющей конструкции изделия.

5. Промежутки, как квази-СЧ, «образуют» с реальными СЧ квази-узлы, которые используются для формирования реальных геометрических элементов создаваемой конструкции.

6. Являясь самыми общими понятиями, отражающими то, что присуще любым изделиям, предлагаемые инструменты конструирования позволяют приблизиться к решению задачи формализации процесса «придумывания» конструкции. На рис. 5 приведены два варианта конструкций винтовых механизмов с одинаковыми кинематическими характеристиками.

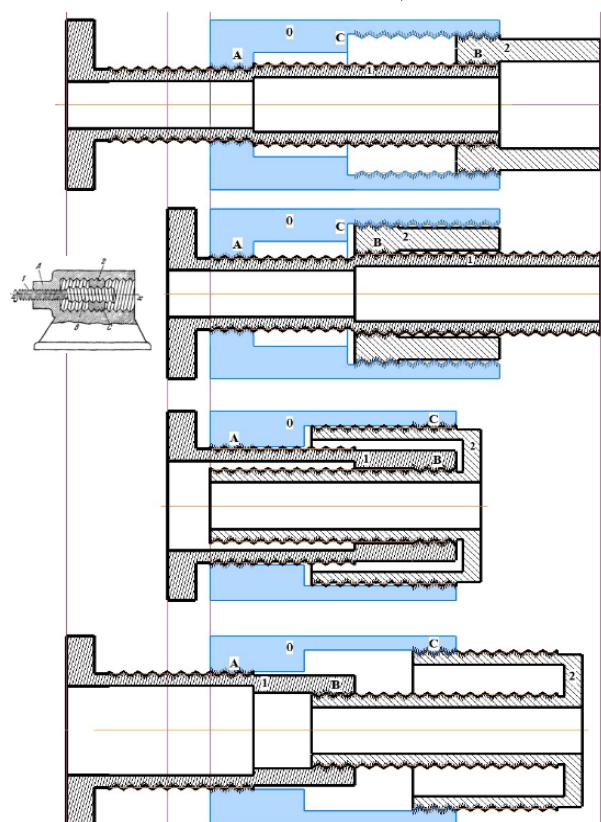


Рис. 5. Винтовые механизмы
Fig. 5. Screw mechanisms

На рисунке изображены конструкции винтовых механизмов с одинаковыми кинематическими характеристиками. Верхний выполнен по схеме, приведенной в [30]. Схема изображена на рисунке. Конструкция второго механизма «придумана» с нуля с помощью предложенных инструментов.

7. Перечисленные инструменты конструирования могут применяться как при разработке одного изделия, так и при проектировании семейства изделий. В результате группового проектирования создается унифицированная элементная база составных частей изделий и методика синтеза на ее основе кастомизированных изделий, обеспечивая минимальные затраты на единицу продукции. На основе элементной базы семейства может быть создана платформа многократно используемых компонентов в том числе и их компьютерные двойники для реализации групповой технологии создания и сопровождения изделий семейства в течении их жизненного цикла.

Список источников:

1. Базров Б.М. Модульная технология в машиностроении. – М.: Машиностроение, 2001. – 368 с.
2. Афанасьев А.А. Цифровая трансформация промышленного производства: теоретические аспекты и политика ее реализации: Научный доклад. – М.: ИЭ РАН, 2024. – 76 с.
3. Белоусов А.Р. Противоречия и перспективы развития системы воспроизведения российской экономики. Автореф. Дис. ... докт. экономических наук. Москва: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. 2006 г.
4. Базров Б.М., Хейфец М.Л. Описание изделия структурированным множеством модулей // Инновации в машиностроении: Сборник трудов X Международной научно-практической конференции, Кемерово, 26–29 ноября 2019 года / Под редакцией В.Ю. Блюменштейна. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2019. – С. 35-40.
5. Научно-методические основы актуализации теории базирования на основании анализа степеней свободы предмета базирования / Б. М. Базров, Н.А. Родионова, Ю. В. Будкин [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2022. – № 2(59). – С. 77-87.
6. Базров Б.М. Структура машиностроительного изделия // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2024. – № 7. – С. 43-48.
7. Межотраслевая унификация и агрегатирование самоходных машин-орудий и автотранспорта / Под ред. В.В. Бойцова. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 448 с.
8. Лось Л.В. Теория структуры конструкций технологических машин и приборов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Харьков, 1992.
9. Бобков Н.М. О конструкторской терминологии национальных стандартов // Стандарты и качество. – 2012. – № 9. – С. 48-52.
10. Р50-54-103-88 «Рекомендации. Модульные и базовые конструкции изделий. Основные положения». – М.: ВНИИМаш, 1989. – 29 с.
11. Васильев А.Л. Модульный принцип в судостроении // Стандарты и качество. – 1983. – № 1. – С. 8-14.
12. Корыtko O.B. Опыт ускоренного создания исполнительных устройств роботов модульных конструкций // Стандарты и качество. – 1987. – № 4. – С. 26-30.
13. Крейтер С.В. О создании научных принципов модульной разработки и производства изделий // Стандарты и качество. – 1983. – № 1. – С. 6-8.
14. Шебанов В.И. Теоретические предпосылки метода агрегатирования и модульного проектирования // Стандарты и качество. – 1983. – № 2. – С. 8-10.
15. Третьяков В.М. Групповое проектирование унифицированных редукторов для приборов следящего привода: дис. канд. техн. наук: 05.02.02: защищена 03.03.1988: утв. 15.08.1988 / Третьяков Владимир Михайлович. – Владимир, 1987г. – 242 с.
16. Граськин С.С., Ермолов И.Л., Хрипунов С.П. Концептуальные основы платформенно-модульного подхода к разработке перспективных робототехнических комплексов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2023. – № 24(12). – С. 619-626.
17. Третьяков В.М. Групповая технология создания семейства изделий // Вестник машиностроения. – 2000. – № 4. – С. 45-48.
18. Berschik M.C., Zuefle M., Laukotka F.N., Krause D. Product family engineering along the life cycle – research aspects to cope with variability in advanced systems; The Author(s), 2024. Published by Cambridge University Press.

References:

1. Bazrov B.M. Modular Technology in Mechanical Engineering. Moscow: Mashinostroenie; 2001.
2. Afanasyev A.A. Digital Transformation of Industrial Production: Theoretical Aspects and Policy of Its Implementation. Scientific Report. Moscow: Institute of Economics RAS; 2024.
3. Belousov A.R. Contradictions and Evolution of the Reproduction System of the Russian Economy. Doctor of Economic Sciences Dissertation Abstract. Moscow: Institute of Economic Forecasting RAS; 2006.
4. Bazrov BM, Heyfets ML. Description of the Product by Structured Multiple Modules. In: Blumenshteyn VYu, editor. Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference on Innovation in Mechanical Engineering; 2019 Nov 26-29; Kemerovo. Kemerovo: T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University; 2019. p. 35-40.
5. Bazrov BM, Rodionova NA, Budkin YV, et al. Scientific and Methodological Foundations of the Locating Theory Actualization Based on the Degrees of Freedom Analysis of the Locating Object. Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials. 2022;(2):77-87.
6. Bazrov B.M. Mechanical Product Structure. Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering. 2024;(7):43-48.
7. Boytsov VV, editor. Intersectoral Unification and Aggregation of Self-Propelled Machines and Automobile Transport. Moscow: Standards Publishing House; 1975.
8. Los L.V. The Structure Theory of Design of Technological Machines and Devices. Doctor of Technical Sciences Dissertation Abstract. Kharkov; 1992.
9. Bobkov N.M. On Design Terminology of National Standards. Standards and Quality. 2012;(9):48-52.
10. Р50-54-103-88 Recommendations. Modular and Basic Constructions of Products. Main Provisions. Moscow: VNIIINMASH; 1989.
11. Vasilyev A.L. Modular Principle in Shipbuilding. Standards and Quality. 1983;(1):8-14.
12. Korytko O.B. Experience of Accelerated Creation of Executive Devices of Modular Robots. Standards and Quality. 1987;(4):26-30.
13. Kreiter S.V. Establishing Scientific Principles for Modular Development and Manufacturing of Products. Standards and Quality. 1983;(1):6-8.
14. Shebanov V.I. Theoretical Assumptions of Aggregation Method and Modular Design. Standards and Quality. 1983;(2):8-10.
15. Tretyakov V.M. Group Design of Unified Gearboxes for Tracking Drive Instrumentation. Candidate of Technical Sciences Dissertation Abstract. Vladimir; 1987.
16. Graskin S.S, Ermolov I.L., Khripunov S.P. Conceptual Propositions for Creation of Perspective Robotic Systems Based on Platform-Modular Approach. Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2023;(24):619-626.
17. Tretyakov V.M. Group Technology for Creating Families of Products. Russian Engineering Research. 2000;(4):45-48.
18. Berschik MC, Zuefle M, Laukotka FN, et al. Product Family Engineering Along the Life Cycle – Research Aspects to Cope with Variability in Advanced Systems. Cambridge: Cambridge University Press; 2024.

19. Третьяков В.М. Конструирование семейств изделий машиностроения. Монография: [в 2 ч.]. / В.М. Третьяков; Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высшего проф. образования «Ковровская гос. Технологическая акад. им. В.А. Дегтярева». Ковров, 2009.
20. Третьяков В.М. Групповое проектирование технических устройств. Разработка элементной базы // Автоматизация и современные технологии. – 1997. – № 9. – С. 10-21.
21. Третьяков В.М. Математические модели для определения номенклатуры компонентов элементной базы семейства машин // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1999. – № 2. – С. 8-13.
22. Третьяков В.М. Формирование простых кинематических пар на основе узла сопряжения «точка» // Теория механизмов и машин. – 2015. – № 2. – Т. 13. – С. 46-61.
23. Третьяков В.М. Построение рациональных планетарных механизмов на основе матричного метода структурного анализа // Транспортное машиностроение. – 2022. – №4(4). – С. 4-16.
24. Третьяков В.М. Способ моделирования многокомпонентных изделий в компьютерных системах двух- и трехмерного проектирования. Патент на изобретение №2622211 заявитель и патентообладатель АО «ВНИИ «Сигнал» – №2014125774; заявл. 25.06.2014; опубл. 13.06.2017, Бюл. №17.
25. Третьяков В.М. Использование понятия «узел сопряжения» при конструировании изделий машиностроения // Вестник в машиностроении. – 2010. – № 12. – С. 24-30.
26. Третьяков В.М. Матричный метод структурного анализа и синтеза механизмов // Современное машиностроение: Наука и образование. – 2022. – № 11. – С. 137-150.
27. Третьяков В.М. Конструирование изделий машиностроения. Определение координат узлов сопряжения // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2010. – № 10. – С. 11-21.
28. Третьяков В. М. Применение узлов сопряжения при проектировании изделий // Современное машиностроение: Наука и образование. – 2014. – № 4. – С. 443-453.
29. Божко А.Н., Ливанцов В.Э. Оптимизация стратегии геометрического анализа в автоматизированных системах проектирования // Компьютерные исследования и моделирование. – 2024. – Т. 16. – № 4. – С. 825-840.
30. Артоболевский И.И. Механизмы в современной технике: Справочное пособие. В 7 томах. Т.III. Рычажно-кулачковые, ... – 2-е изд., переработанное. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 416 с
19. Tretyakov V.M. Design of Family of Mechanical Engineering Products. Kovrov: Kovrov State Technological Academy of Degtyarev; 2009. 2 vols.
20. Tretyakov V.M. Group Design of Technical Equipment. Element Base Development. Automation. Modern Technologies. 1997;(9):10-21.
21. Tretyakov V.M. Mathematical Models for Determining Component List of Element Base for Family of Machines. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 1999;(2):8-13.
22. Tretyakov V.M. Formation of Simple Kinematic Pairs on the Basis of an Interface Node "Point". Theory of Mechanisms and Machines. 2015;(2)(13):46-61.
23. Tretyakov V.M. Construction of Efficient Planetary Gears Based on the Matrix Method of Structural Analysis. Transport Engineering. 2022;(4)(4):4-16.
24. Tretyakov V.M. Modelling Multicomponent Products in Computer-Based Two-Dimensional and Three-Dimensional Design Systems. Patent RU 2622211C1; Jun 13, 2017.
25. Tretyakov V.M. Use of the Concept Interfacing Node in the Design of Engineering Products. Vestnik Mashinostroyenia. 2010;(12):24-30.
26. Tretyakov V.M. Matrix Method of Structural Analysis and Synthesis of Mechanisms. Modern Mechanical Engineering: Science and Education. 2022;(11):137-150.
27. Tretyakov V.M. Mechanical Engineering Product Design. Defining Coordinates of Coupling Nodes. Assembling in Mechanical Engineering, Instrument-Making. 2010;(10):11-21.
28. Tretyakov V.M. Application of Coupling Nodes in Product Design. Modern Mechanical Engineering: Science and Education. 2014;(4):443-453.
29. Bozhko A.N, Livantsov V.E. Optimization of Geometric Analysis Strategy in CAD-Systems. Computer Research and Modelling. 2024;16(4):825-840.
30. Artobolevskiy I.I. Mechanisms in Modern Engineering Design: Reference Guide. 2nd ed. Moscow: Nauka; 1979. Volume 3, Gear Mechanisms.

Информация об авторах:

Третьяков Владимир Михайлович

доктор технических наук, профессор кафедры «Гидропневмоавтоматики и гидропривода» «Ковровской государственной технологической академии им. В.А. Дегтярева»

Статья поступила в редакцию 15.03.2025; одобрена после рецензирования 28.04.2025; принята к публикации 19.05.2025.

The article was submitted 15.03.2025; approved after reviewing 28.04.2025; accepted for publication 19.05.2025.

Рецензент – Пугачев А.А., доктор технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.

Reviewer – Pugachev A.A., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.

Information about the authors:

Tretyakov Vladimir Mikhaylovich

Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Hydraulic and Pneumatic Automation and Hydrodrive of Kovrov State Technological Academy of Degtyarev