

Расчет и конструирование машин

УДК 621.01

Направленный синтез оптимальных структур плоских механических систем с совмещенными шарнирами (механизмы, фермы, группы Ассура, роботы). Часть 2

В.И. Пожбелко

На основе представленной (в части 1 данной статьи) базовой универсальной структурной таблицы 1 выполнен направленный структурный синтез и составлен каталог структурных схем, реализующих все 62 возможных расчетных кода строения 6-, 8-, 10- и 12-звенных замкнутых кинематических цепей одноподвижных механизмов оптимальной структуры с совмещенными двойными шарнирами. Установлено существование и составлен атлас из 37 конкретных структур 8-звенных замкнутых кинематических цепей с двойными совмещенными шарнирами. Даны примеры эффективного применения механических систем оптимальной структуры с совмещенными шарнирами в разных областях техники (двигатели внутреннего сгорания, автогрейдеры, камнедробилки, пресса, трикотажные машины, фермы и многопролетные мосты).

Ключевые слова: структурный синтез, структурная математическая модель, совмещенные многократные шарниры, механизмы, фермы, группы Ассура, роботы.

Directed structural synthesis of optimal planar mechanical systems with complex pin-joints (mechanisms, pin frameworks, Assur groups, robots). Part 2

V.I. Pozhbelko

On the basis of basic universal structural table 1 (part 1 of the article) the structural synthesis has been carried out and the catalog of structural schemes realizing all 62 possible design codes of 6-, 8-, 10- and 12-membered closed kinematic chains of one-degree-of-freedom optimal structure mechanisms combined with double hinges has been drawn up. The existence of 37 particular structures of eight-link closed kinematic chains with double combined hinges is established and the atlas is compiled. The examples are given to effectively apply the optimal structure of mechanical systems with combined hinges in various areas of technology



ПОЖБЕЛКО

Владимир Иванович

заслуженный работник
высшей школы РФ,
доктор технических наук,
профессор кафедры
«Теоретическая механика
и основы проектирования
машин»

(Южно-Уральский
государственный
университет)
e-mail: vipox@inbox.ru

(internal combustion engines, motor graders, crushers, presses, knitting machines, farms and multi-bridges).

Keywords: structural synthesis, structural mathematical model, complex pin-joints, mechanisms, pin frameworks, assur groups, robots.

Предлагаемая работа (часть 2) является логическим продолжением разработок теории и практики синтеза оптимальных структур [1, 2] по рассчитанным на основе уравнений структурной математической VIP-модели [2] универсальным структурным таблицам стандартных кодов правильного строения плоских механических систем с совмещенными многократными шарнирами. Данные коды устанавливают состав строения шарнирно-рычажных механических систем (n_i, v_j), требуемый для выполнения нулевого значения определителя D целевой функции синтеза оптимальных структур вида [2]:

$$D = n_2 - [n_4 + 2n_5 + 3n_6 + \dots + (Y-1)n_{Y+2}] - (v_2 + 2v_3 + 3v_4 + \dots + Yv_{Y+1}) - (W + 3) = 0,$$

где n_i — число i -парных, например, двухшарнирных (n_2), трехшарнирных (n_3) и т. д. звеньев, $2 \leq i \leq Y + 2$; v_j — число совмещенных j -кратных шарниров $2 \leq j \leq Y + 1$; W — требуемая подвижность синтезируемой системы; Y — задаваемый уровень сложности синтезируемой системы [1], равный разности между числом используемых подвижных соединений звеньев и общим числом этих звеньев (где $Y = 0; 1; 2; 3 \dots$) и предопределяющий число образуемых этими звеньями замкнутых контуров ($K = Y + 1$), наиболее сложное многопарное звено кинематической цепи ($i_{\max} = Y + 2$) и наибольшую кратность совмещенных шарниров ($j_{\max} = Y + 1$).

При дальнейшем анализе представленного в универсальных структурных таблицах [1, 2] перечня расчетных стандартных кодов оптимальных структур возникает два вопроса:

1) все ли указанные в этих структурных таблицах стандартные коды правильного строения (представляющие собой всего лишь целочисленные математические решения уравнений «VIP-модели» из условия $D = 0$) — могут быть практически реализованы в виде конкретных структурных схем?;

2) являются ли эти универсальные структурные таблицы полными по перечню представленных в них возможных кодов оптимальных структур, определяющих все возможные варианты численного состава (n_i, v_j) их строения?

Положительный ответ на первый вопрос представлен на рис. 1, где синтезированы все 62 стандартных кода строения с двойными совмещенными шарнирами из базовой универсальной структурной табл. 1 [1, 2] в виде 62 неизоморфных (неповторяющихся) структурных схем (проверка — для всех этих схем выполняется условие $D = 0$).

Положительный ответ на второй вопрос следует из анализа представленных в разных справочниках по машиностроению [3–6] конструкторских разработок — при этом согласно структурной табл. 1 [1, 2] существует множество стандартных кодов строения оптимальных структур, еще не реализованных в виде механических систем для различных областей техники.

Более того, можно утверждать, что любые создаваемые конструкторами структуры, состав которых отсутствует в указанных таблицах с полным перечнем стандартных кодов строения [1, 2], будут нерациональными конструкциями (например, рассмотренный в работе [1] 5-звенный параллелограммный механизм с избыточными связями, возникающими из-за нестандартного кода своего строения 32/0, отсутствующего в указанной структурной табл. 1). Основная причина недостатков таких дефектных структур — это нарушение представленных в работах [3–6] теорем о закономерностях строения систем оптимальной структуры. Таким образом, все представленные в универсальных табл. 1–5 [2] стандартные коды правильного строения наглядно отображают весь спектр возможных оптимальных структурных решений и поэтому имеют как научное, так и практическое значение.

Интересно отметить, что за счет различного взаиморасположения между собой совмещенных шарниров ($v_2 = 1 \dots 4$), 2-шарнирных ($n_2 = 5 \dots 8$), 3-шарнирных ($n_3 = 0 \dots 3$) и 4-шарнирных ($n_4 = 0, n_4 = 1$) звеньев — общее число из шести показанных в каталоге на рис. 1 8-звенных цепей (коды 530/1, 611/1, 620/2, 701/2,

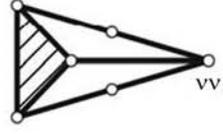
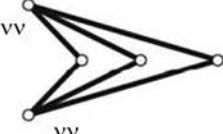
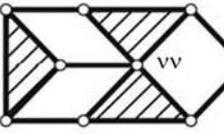
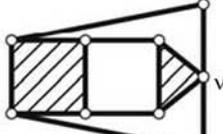
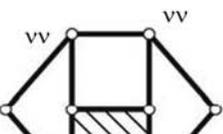
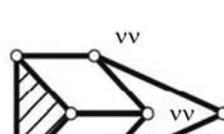
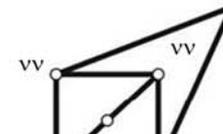
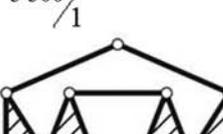
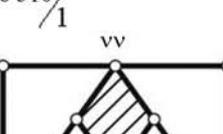
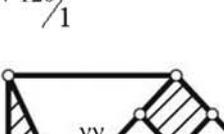
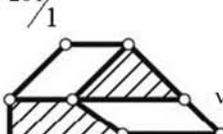
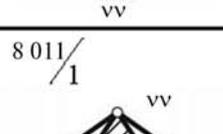
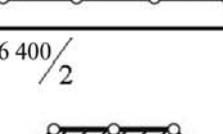
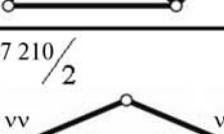
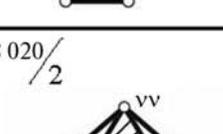
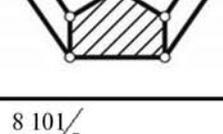
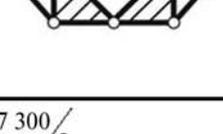
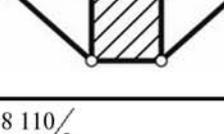
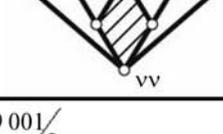
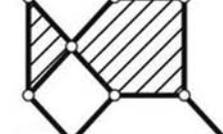
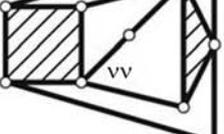
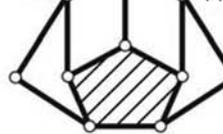
Код $51/1$ 	$60/2$ 	$530/1$ 	$611/1$ 
$620/2$ 	$701/2$ 	$710/3$ 	$800/4$ 
$5\ 500/1$ 	$6\ 310/1$ 	$7\ 120/1$ 	$7\ 201/1$ 
$8\ 011/1$ 	$6\ 400/2$ 	$7\ 210/2$ 	$8\ 020/2$ 
$8\ 101/2$ 	$7\ 300/3$ 	$8\ 110/3$ 	$9\ 001/3$ 
$8\ 200/4$ 	$9\ 010/4$ 	$9\ 100/5$ 	$10,000/6$ 

Рис. 1. Каталог многозвенных кинематических цепей одноподвижных механизмов оптимальной структуры с совмещенными двойными шарнирами (реализация всех стандартных кодов из универсальной табл. 1 [2] — симметричные схемы с $v = v_2$, $Y = 1; 2; 3; 4$, $\tilde{n} = 6; 8; 10; 12$) (начало: $\tilde{n} = 6$, $\tilde{n} = 8$, $\tilde{n} = 10$; $v_2 = 1 \dots 6$)

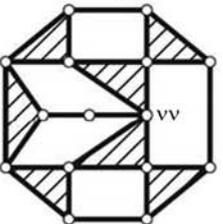
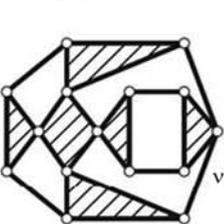
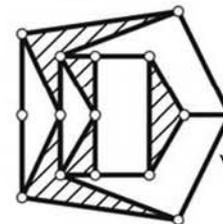
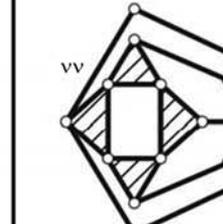
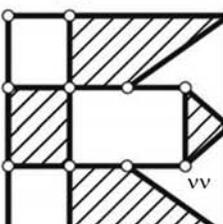
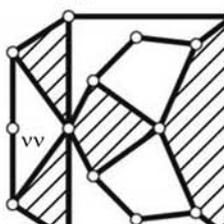
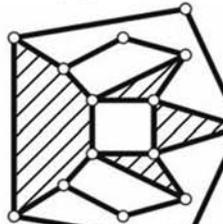
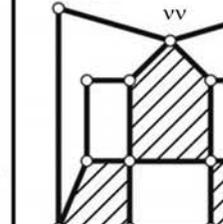
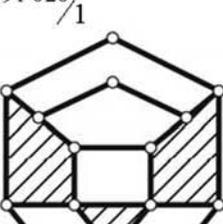
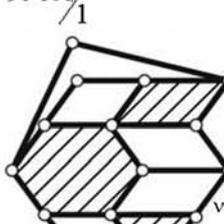
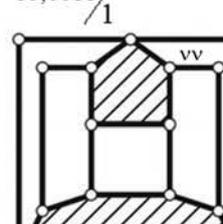
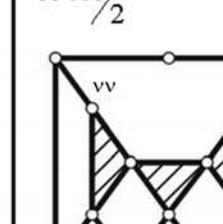
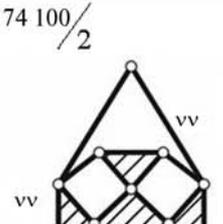
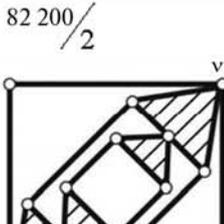
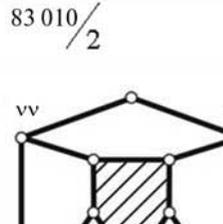
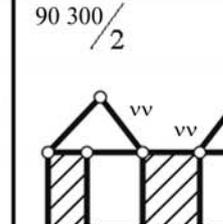
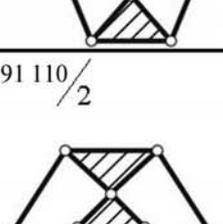
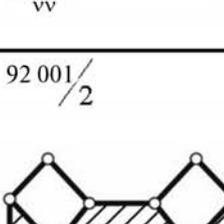
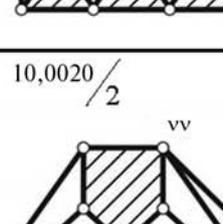
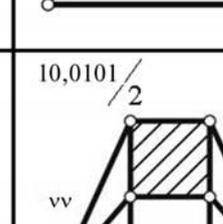
Код 57 000/ 1 	65 100/ 1 	73 200/ 1 	74 010/ 1 
81 300/ 1 	82 110/ 1 	83 001/ 1 	90 210/ 1 
91 020/ 1 	91 101/ 1 	10,0011/ 1 	66 000/ 2 
74 100/ 2 	82 200/ 2 	83 010/ 2 	90 300/ 2 
91 110/ 2 	92 001/ 2 	10,0020/ 2 	10,0101/ 2 

Рис. 1. Каталог многозвенных кинематических цепей одноподвижных механизмов оптимальной структуры с совмещенными двойными шарнирами (реализация всех стандартных кодов из универсальной табл. 1 [2] — симметричные схемы с $v = v_2$, $Y = 1; 2; 3; 4$, $\bar{n} = 6; 8; 10; 12$) (продолжение: $\bar{n} = 12$; $v_2 = 1, v_2 = 2$)

<p>Код $75\ 000/3$</p>	<p>$83\ 100/3$</p>	<p>$91\ 200/3$</p>	<p>$92\ 010/3$</p>
<p>$10,0110/3$</p>	<p>$10,1001/3$</p>	<p>$84\ 000/4$</p>	<p>$92\ 100/4$</p>
<p>$10,0200/4$</p>	<p>$10,1010/4$</p>	<p>$11,0001/4$</p>	<p>$93\ 000/5$</p>
<p>$10,1100/5$</p>	<p>$11,0010/5$</p>	<p>$10,2000/6$</p>	<p>$11,0100/6$</p>
<p>$11,1000/7$</p> <p>а) $v_2 = 7, v = 7$</p>	<p>б) $v_2 = 5, v_3 = 1$ $v = v_2 + 2v_3 = 7$</p>	<p>$12,0000/8$</p> <p>а) $v_2 = 8, v = 8$ б) $v_5 = 2, v = 8$</p>	<p>$12,0000/8$</p>

Рис. 1. Каталог многозвенных кинематических цепей одноподвижных механизмов оптимальной структуры с совмещенными двойными шарнирами (реализация всех стандартных кодов из универсальной табл. 1 [2] — симметричные схемы с $v = v_2$, $Y = 1; 2; 3; 4$, $\tilde{n} = 6; 8; 10; 12$) (окончание: $\tilde{n} = 12$; $v_2 = 3 \dots 8$; б — варианты структур с трехкратными и пятикратными шарнирами)

710/3, 800/4) можно дополнительно увеличить в 6 раз и составить атлас из 37 неизоморфных схем (рис. 2). За счет последующего использования в этих 37 структурных схемах различных вариантов выбора стойки и входного звена можно многократно (до нескольких сотен) увеличить число синтезируемых схем 8-звенных трехконтурных механизмов оптимальной структуры ($D = 0$).

На рисунке 3 представлены примеры изделий серийного машиностроения из разных областей техники [1–4], где за счет применения совмещенных шарниров в механических шарнирно-рычажных системах оптимальной структуры ($D = 0$) достигается следующее положительное упрощение конструкции:

а) мощные многоцилиндровые двигатели внутреннего сгорания по V-образной схеме без прицепных шатунов (код 51/1) — за счет применения двойных совмещенных шарниров все шатуны выполнены одинаковыми и установлены прямо на коленчатый вал, что существенно упрощает конструкцию и систему смазки тяжелонагруженных гидродинамических подшипников скольжения шатунов (это основная конструкция кривошипно-шатунного механизма для всех современных большегрузных колесных и гусеничных машин);

б) механизм щековой камнедробилки (код 51/1) — обеспечивает значительные усилия сжатия дробимого камня в конце рабочего хода;

в) механизм криволинейного поступательного перемещения отвала автогрейдера (код 60/2) — выполнен по компактной схеме на основе двух совмещенных двойных шарниров;

г) механизм пресса для глубокой вытяжки полых изделий типа гильз (код 620/2) — обеспечивает постоянную скорость ползуна на некотором участке и его приближенный выстой в конце рабочего хода при непрерывном вращении входного звена с постоянной скоростью;

д) шарнирный прямолинейно-направляющий механизм (код 800/4) — установка четырех совмещенных двойных шарниров позволяет решить задачу преобразования вращательного движения в прямолинейное без применения

ненадежных поступательных соединений звеньев;

е) механизм горизонтального молота (код 7201/1) — обеспечивает встречное взаимодействие с заготовкой двух ударных рабочих органов для их динамического уравнивания;

ж) шарнирный механизм привода крючковых игл основовязальной трикотажной машины (код 8110/3) — обеспечивает заданный сложный закон движения коромысла с рабочим органом;

з) шарнирный механизм пяти параллельных кривошипов — обеспечивает синхронную передачу тяговых усилий на все тяговые колеса тепловозов и электровозов;

и) механизм пресса для обжатия длиномерных изделий (код 10.1100/5) — обеспечивает равномерный прижим по всей длине при изготовлении многослойных стеновых панелей;

к) механизм привода летучих ножниц ($W = 2$, код 8210/2) — обеспечивает независимую самоустановку двух режущих рабочих органов относительно обрезаемой заготовки;

л) статически определяемая балочная ферма на основе 3-звенных шарнирных замкнутых контуров ($W = 0$, $\tilde{n} = 15$, $v_2 = 3$, $v_3 = 4$) — представляет собой шарнирную стержневую механическую систему, в которой не возникают добавочные напряжения вследствие неодинаковой осадки фундаментов опор и неодинакового нагрева элементов фермы;

м) статически определяемая висячая ферма на основе 3-звенных шарнирных замкнутых контуров ($W = 0$, $\tilde{n} = 23$, $v_2 = 4$, $v_3 = 7$) — с аналогичным положительным эффектом;

н) статически определяемая шарнирная система двухпролетного моста на основе 4-звенных шарнирных замкнутых контуров ($W = 0$, $\tilde{n} = 7$, $v_2 = 1$, код 430/1) обеспечивает самоустанавливаемость всех шарнирных звеньев моста при его нагружении;

с) статически определяемая шарнирная система 4-пролетного моста на основе 5-звенных шарнирных замкнутых контуров ($W = 0$, $\tilde{n} = 15$, $v_2 = 3$, код 10,221000/3) — обеспечивает самоустанавливаемость каждого пролета моста при его нагружении.

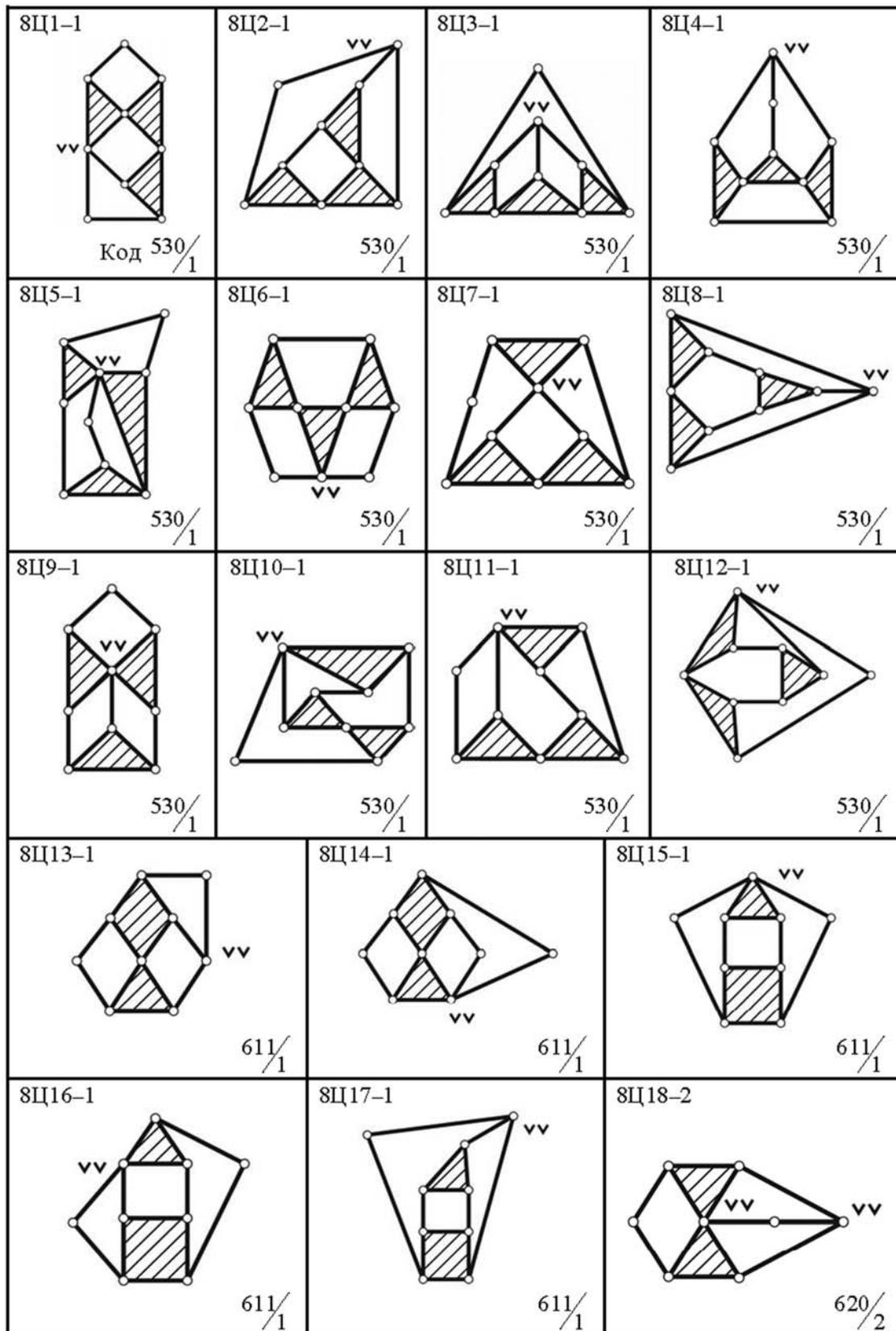


Рис. 2. Атлас 8-звенных кинематических цепей одноподвижных механизмов оптимальной структуры (синтез по стандартным кодам строения из универсальной табл. 1 [2] с различным числом совмещенных двойных и тройных шарниров ($v_2 = 1, v_2 = 2, v_2 = 3, v_2 = 4; v_3 = 0, v_3 = 1, v_3 = 2$) (начало)

<p>8Ц19-2</p> <p>$620/2$</p>	<p>8Ц20-2</p> <p>$620/2$</p>	<p>8Ц21-2</p> <p>$620/2$</p>	
<p>8Ц22-2</p> <p>$620/2$</p>	<p>8Ц23-2</p> <p>$620/2$</p>	<p>8Ц24-2</p> <p>$620/2$</p>	<p>8Ц25-2</p> <p>$620/2$</p>
<p>8Ц26-2</p> <p>$620/2$</p>	<p>8Ц27-2</p> <p>$620/2$</p>	<p>8Ц28-2</p> <p>$620/2$</p>	<p>8Ц29-2</p> <p>$620/2$</p>
<p>8Ц30-2</p> <p>$701/2$</p>	<p>8Ц31-3</p> <p>$710/3$</p>	<p>8Ц32-3</p> <p>$710/3$</p>	<p>8Ц33-3</p> <p>$710/3$</p>
<p>8Ц34-4 ($v_2=4, v_3=0$)</p> <p>$v=v_2=4 \quad 800/4$</p>	<p>8Ц35-0,1 ($v_2=0, v_3=1$)</p> <p>$v=2v_3=2 \quad 701/2$</p>	<p>8Ц36-1,1 ($v_2=1, v_3=1$)</p> <p>$v=v_2+2v_3=3 \quad 710/3$</p>	<p>8Ц37-0,2 ($v_2=0, v_3=2$)</p> <p>$v=2v_3=4 \quad 800/4$</p>

Рис. 2. Атлас 8-звенных кинематических цепей одноподвижных механизмов оптимальной структуры (синтез по стандартным кодам строения из универсальной табл. 1 [2] с различным числом совмещенных двойных и тройных шарниров ($v_2 = 1, v_2 = 2, v_2 = 3, v_2 = 4; v_3 = 0, v_3 = 1, v_3 = 2$) (окончание)

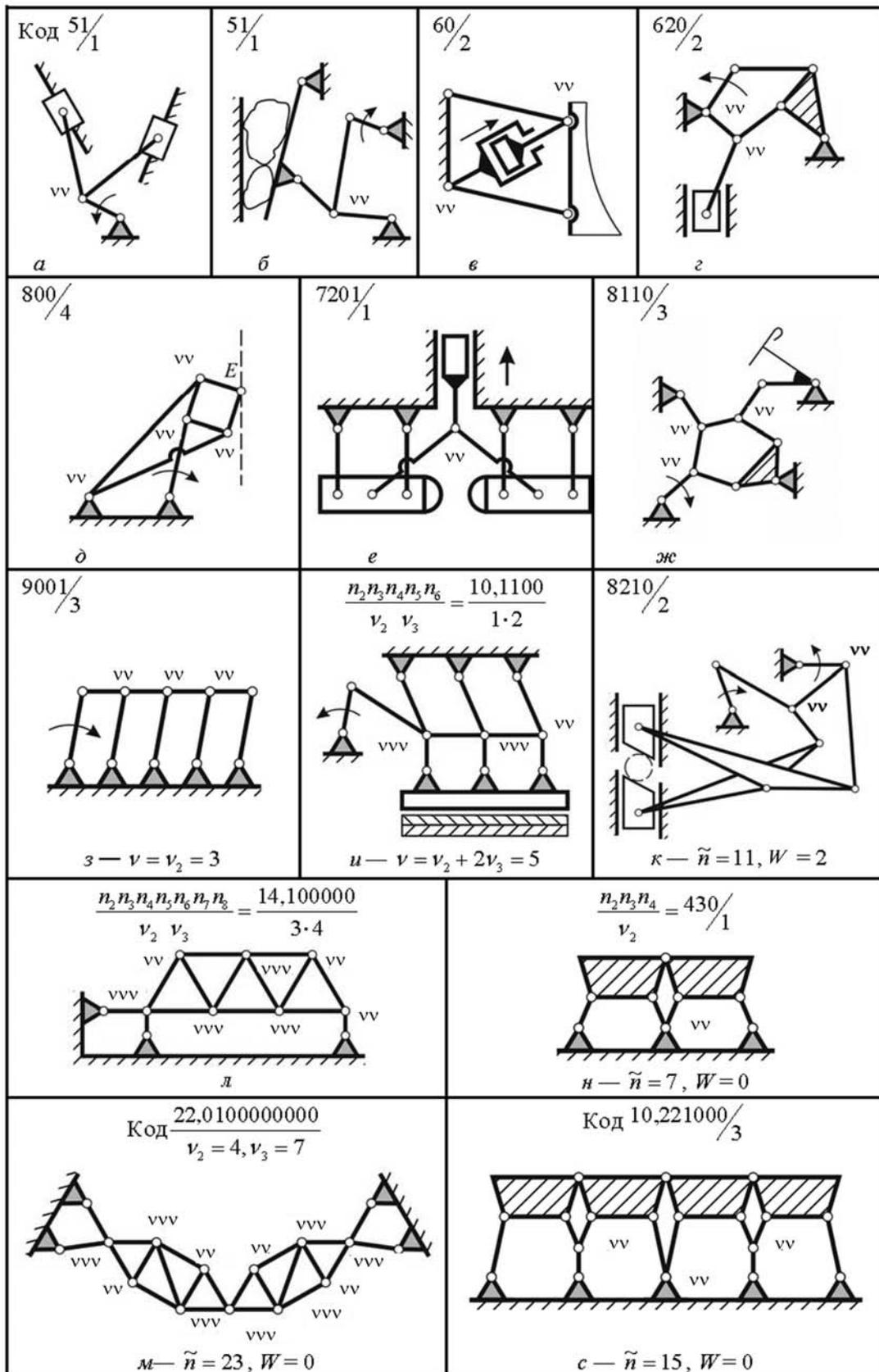


Рис. 3. Области практического применения в технике оптимальных структур механических систем с совмещенными шарнирами ($D = 0$)

Выводы

1. Все без исключения расчетные стандартные коды строения систем разного уровня сложности с совмещенными шарнирами из базовой универсальной структурной табл. 1 [1, 2] могут быть практически реализованы в виде представленных на рис. 1 разнообразных 62 замкнутых кинематических цепей одноподвижных механизмов, состав которых (n_i, v_j) полностью удовлетворяет целевой функции $D=0$ синтеза оптимальных структур.

2. Направленный синтез оптимальных структур по целевой функции $D=0$ устанавливает существование дополнительных 37 схем 8-звенных замкнутых кинематических цепей одноподвижных механизмов ($W=1$) с двойными и тройными шарнирами (см. рис. 2), с учетом которых диапазон 8-звенных неизоморфных цепей (ранее содержащий только 16 схем с простыми шарнирами [7, 8]) теперь увеличивается до $16+37=53$ схем, т. е. в 3 раза.

3. С учетом установленной в работе [1] прямой взаимосвязи между числом замкнутых контуров K , образуемых звеньями кинематической цепи механической системы, и уровнем Y ее сложности ($K = Y + 1$), предлагаемая в работе [2] структурная математическая «VIP — модель» будет иметь вид:

$$n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5 + n_6 + \dots + n_{K+1} = W + (h - 1)K + 1;$$

$$n_1 + 2n_2 + 3n_3 + 4n_4 + 5n_5 + 6n_6 + \dots + (K + 1)n_{K+1} + v = 2(W + hK);$$

$$v = v_2 + 2v_3 + 3v_4 + 4v_5 + 5v_6 + \dots + (K - 1)v_K \leq 2(K - 1); \quad v_K \leq 2,$$

и может применяться для направленного структурного синтеза различных механических систем с заданным числом образуемых их звеньями замкнутых контуров K (в любых синтезируемых структурах [2] значение K равно числу всех цифр в числителе кода их строения).

Все полученные целочисленные решения указанной «VIP — модели» систематизированы в виде пяти универсальных структурных таблиц

с примерами синтезированных по ним 170 разнообразных многоконтурных оптимальных структур с совмещенными шарнирами ($Y = -1, K = 0; Y = 0, K = 1; Y = 1, K = 2; Y = 2, K = 3; Y = 3, K = 4; Y = 4, K = 5$), представленных в частях 1 и 2 данной работы.

Примечание. Согласно выполненному анализу технических справочников [3–6] жизнеспособными и рациональными оказались именно те структуры, состав которых точно соответствует расчетным стандартным кодам из универсальных структурных таблиц 1–5 [1, 2], причем в ряде случаев (например, схемы 51/1 и 60/2 на рис. 3) применение совмещенных шарниров может быть единственно возможным оптимальным структурным решением.

Литература

1. *Пожбелко В.И.* Структурный анализ и синтез плоских механизмов заданного уровня сложности по универсальной структурной таблице стандартных кодов строения // Теория механизмов и машин. 2012. Т. 10. № 1(19). С. 24–45 (tmm.spbstu.ru).
2. *Пожбелко В.И.* Направленный синтез оптимальных структур плоских механических систем с совмещенными шарнирами (механизмы, фермы, группы Ассур, роботы): В 2 ч. Ч. 1 // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2012. № 10. С. 31–45.
3. *Крайнев А.Ф.* Механика (искусство построения) машин. Фундаментальный словарь. М.: Машиностроение, 2000. 904 с.
4. *Кожевников С.Н.* Механизмы / Справочник. М.: Машиностроение, 1965. 1058 с.
5. *Решетов Л.Н.* Самоустанавливающиеся механизмы. М.: Машиностроение, 1979. 334 с.
6. *Артоболевский И.И.* Механизмы в современной технике / Справочник. Т. 1. Шарнирно-рычажные механизмы. М.: Наука, 1979. 495 с.
7. *Пейсах Э.Е.* Атлас структурных схем восьмизвенных плоских шарнирных механизмов // Теория механизмов и машин. 2006. Т. 4. № 1(7). С. 3–17 (tmm.spbstu.ru).
8. *Пейсах Э.Е.* Структурный синтез замкнутых кинематических цепей (цепей Грюблера). Ч. 1. // Теория механизмов и машин. 2008. Т. 6. № 1 (11). С. 4–14 (tmm.spbstu.ru).

Статья поступила в редакцию 20.08.2012