

УДК 62-752

И.И. Сидоренко, д-р техн. наук, доц.,  
С.С. Гутыря, д-р техн. наук, проф.,  
Одес. нац. политехн. ун-т

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАССИВНЫХ ВИБРОИЗОЛИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ КИНЕМАТИЧЕСКИМИ ГРАФАМИ ПЛОСКИХ МЕХАНИЗМОВ

*И.И. Сидоренко, С.С. Гутыря. Моделирование пассивных виброизолирующих устройств кинематическими графами плоских механизмов.* Розглянуто застосування теорії кінематичних графів до моделювання пасивних виброізолюючих пристроїв з механічним зворотним зв'язком. Отримано залежності, що пов'язують кількість полюсів і дуг у кінематичному графі пристрою. Наведено приклад синтезу пристрою.

*И.И. Сидоренко, С.С. Гутыря. Моделирование пассивных виброизолирующих устройств кинематическими графами плоских механизмов.* Рассмотрено применение теории кинематических графов для моделирования пассивных виброизолирующих устройств с механической обратной связью. Получены зависимости определяющие количество полюсов и дуг в кинематическом графе устройства. Приведен пример синтеза устройства.

*I.I. Sydorenko, S.S. Gutyrya. Modelling of passive vibroinsulating devices with kinematic graphs of planar mechanisms.* Application of the theory of kinematics graphs is considered for the design of passive vibroinsulating devices with a mechanical feedback. Dependences determining the amount of poles and arcs in the kinematic graph of the device are obtained. The example of synthesis of the device is adduced.

Інтенсифікації технологічних процесів супутствує розширення частотного спектра вібраційних полів і, як слідство, ускладнення задач ефективної віброізоляції елементів технічних систем. При певних умовах лінійні пасивні віброізолюючі пристрої (ПВУ) не тільки не забезпечують віброізоляцію, але і стають причиною виникнення резонансних процесів. Віброізоляція з використанням нелінійних ПВУ також не завжди ефективна. Такі пристрої дозволяють реалізовувати наближені до кубічно нелінійні пружні характеристики “м'якого” і “жесткого” видів. Такі характеристики близькі до оптимальних тільки для технологічного обладнання, що працює в певному діапазоні частот возмущення (зазвичай, в межах однієї гармоніки). Найкращими, для реалізації оптимальних пружних характеристик в реальному режимі часу, що забезпечують ефективну віброізоляцію технічних систем, є активні слідючі віброізолюючі системи (АСВС). Їх застосування обмежене складністю виготовлення, монтажу і обслуговування, неавтономністю живлення і цілесообразно для дорогого унікального обладнання. Підвищення ефективності віброізоляції шляхом реалізації оптимальних пружних характеристик за допомогою ПВУ неможливо без вдосконалення існуючих конструкцій або створення нових. Отже, розробка і впровадження в практику машинобудування наукових методів аналізу і синтезу ПВУ є актуальним.

Дослідження за застосування теорії графів для аналізу існуючих ПВУ і АСВС дозволили сформулювати основні принципи формування структур ПВУ нового типу, функціональні можливості яких наближені до АСВС. Розширення функціональних можливостей досягається за рахунок реалізації в структурі ПВУ зворотного зв'язку в вигляді механічного контуру, внаслідок чого такі структури отримали назву пасивних віброізолюючих пристроїв з механічною зворотною зв'язкою (ПВУ з МОС) [1]. Проведені дослідження за синтезу аналогічних пристроїв і вивчення їх впливу на коливальні процеси в механічних системах [2, 3].

Узагальнення результатів досліджень дозволило розробити методику синтезу ПВУ з МОС на основі графових моделей, аналогічну методиці синтезу плоских шарнірно-рычажних механізмів [4]. При цьому ідеалізованим представленням структури будь-якого плоского одноосного віброізолюючого пристрою прийнято базовий кінематичний граф (КГ), що характеризує його нульову ступінь подвижності наступним рівнянням:

$$W = 3(p - 1) - 2q_5 - q_4 - q_n = 0, \quad (1)$$

где  $p$  — количество полюсов графа, соответствующее числу жестких звеньев устройства;  
 $q_5$  — количество дуг графа, равное числу кинематических пар пятого класса;  
 $q_4$  — количество дуг графа, равное числу кинематических пар четвертого класса;  
 $q_c$  — количество дуг графа, равное числу упругих связей между жесткими звеньями.

Минимально возможное количество полюсов  $p$  и дуг  $q_5$  кинематического графа ПВУ с МОС было установлено на основании уравнения (1) при условии  $q_4=0$  и  $q_c=1$ , которое было принято для минимизации количества возможных решений. Эти данные, наряду с выработанными принципами построения ПВУ с МОС, позволяют получать модификации базового КГ для последующего синтеза прототипов аналогичных устройств [5]. Конструкторская реализация прототипов и дальнейшее их исследование показали, что с их помощью можно реализовать различные нелинейные упругие характеристики. Так, при соответствующей настройке один из прототипов, синтезированный на основе базового КГ с полюсами  $p = 0, 1 \dots 3$  (рис. 1, а), позволяет реализовать нелинейные упругие характеристики “мягкого” или “жесткого” видов. Другой прототип, синтезированный на основе модификации базового КГ (рис. 1, б), — нелинейные комбинированные упругие характеристики с участками “мягкого” и “жесткого” видов в различном сочетании.

Учитывая полученный результат в виде реализуемых ПВУ с МОС упругих характеристик, аналогичных характеристиками некоторых АСВС, представляется перспективным развитие структуры таких устройств внедрением в МОС кинематических пар четвертого класса. При этом возникает задача определения возможного соотношения между количеством полюсов и дуг КГ в образуемом цикле управления.

Для решения задачи необходимо учесть конструктивные особенности ПВУ с МОС в уравнении (1). Из рассмотрения построенных ранее моделей (см. рисунок 1) следует:

минимальное количество полюсов в цикле анализа КГ ПВУ с МОС, соответствующего упругой части устройства,  $\min p_y=2$ ;

для одноосных ПВУ с МОС связь между подвижной и неподвижной жесткими частями устройства является одноподвижной, следовательно, число соответствующих дуг КГ  $p_{5y}=1$ ;

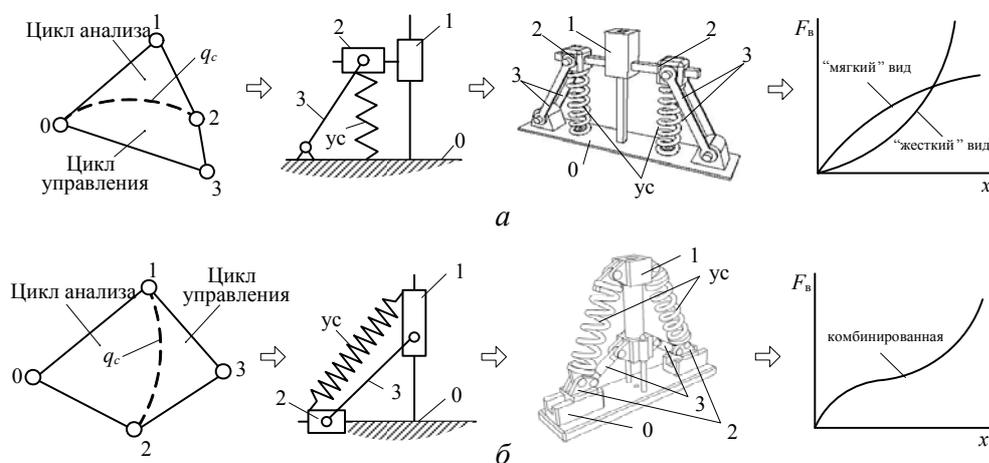


Рис. 1. Схемы синтеза ПВУ с МОС: последовательность КГ — структурная схема — прототип — характеристика восстанавливающей упругой силы  $F_B$  на основе базового КГ (а) и на основе модификации базового КГ (б)

Исходя из этого, количество полюсов  $p$  и дуг  $q_5$  в КГ устройства целесообразно представить в виде сумм слагаемых полюсов и дуг соответствующих упругой части устройств и МОС ( $p=p_y+p_{\text{мос}}$ ;  $q_5=q_{5y}+q_{5\text{мос}}$ ). Поскольку в рассматриваемых типовых устройствах имеется одна упругая связь ( $q_c=1$ ), уравнение (1) имеет вид

$$W = 3[(2 + p_{i \text{ ин}}) - 1] - 2(1 + q_{5i \text{ ин}}) - q_{4i \text{ ин}} - 1 = 0. \quad (2)$$

Полученное выражение позволяет установить требуемую взаимосвязь между количеством полюсов  $p_{\text{мос}}$  и дуг  $q_{5\text{мос}}$  в цикле управления КГ. Например, в случае, когда цикл управления кинематического графа ПВУ с МОС имеет одну дугу, соответствующую кинематической паре четвертого класса ( $q_{4\text{мос}}=1$ ), то из выражения (2) получено  $W = 3[(2 + p_{i \text{ ин}}) - 1] - 2(1 + q_{5i \text{ ин}}) - 1 - 1 = 0$ , следовательно

$$p_{i\ddot{i}n} = \frac{1}{3} + \frac{2}{3}q_{5i\ddot{i}n} . \quad (3)$$

Для условий, когда в цикле управления КГ ПВУ с МОС имеется две дуги, которые соответствуют двум кинематическим парам четвертого класса ( $q_{4\text{МОС}}=2$ ), из уравнения (2) получено

$$p_{i\ddot{i}n} = \frac{2}{3}(1 + q_{5i\ddot{i}n}) . \quad (4)$$

На основании целочисленных равенств (3) и (4) при вариациях параметрами  $p_{\text{МОС}}$  и  $q_{4\text{МОС}}$  может быть получено соответствующее число дуг  $q_{5\text{МОС}}$  (см. таблицу).

*Количества дуг, соответствующих парам пятого класса, в цикле управления КГ ПВУ с МОС*

$p_{\text{МОС}}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$q_{5\text{МОС}}$	$q_{4\text{МОС}}=1$	1			3		5			7		
	$q_{4\text{МОС}}=2$		2			4			6		9	

В качестве примера апробации полученных результатов построим КГ ПВУ с МОС при наличии в контуре МОС одной пары четвертого класса ( $q_{4\text{МОС}}=1$ ). Начальные условия для построения: КГ устройства имеет два полюса  $p_y=2$  (неподвижную 0 и подвижную 1 части устройства), которые объединяет одна дуга  $q_{5y}=1$  (рис. 2, а).

Кроме того, в состав графа должна входить дуга упругой связи  $q_c=1$ , а также один полюс  $p_{\text{МОС}}=1$  и одна дуга  $q_{5\text{МОС}}=1$  обратной связи (см. таблицу). На начальном этапе построения графа расположение дуг обратной связи и дуги упругой связи неизвестно.

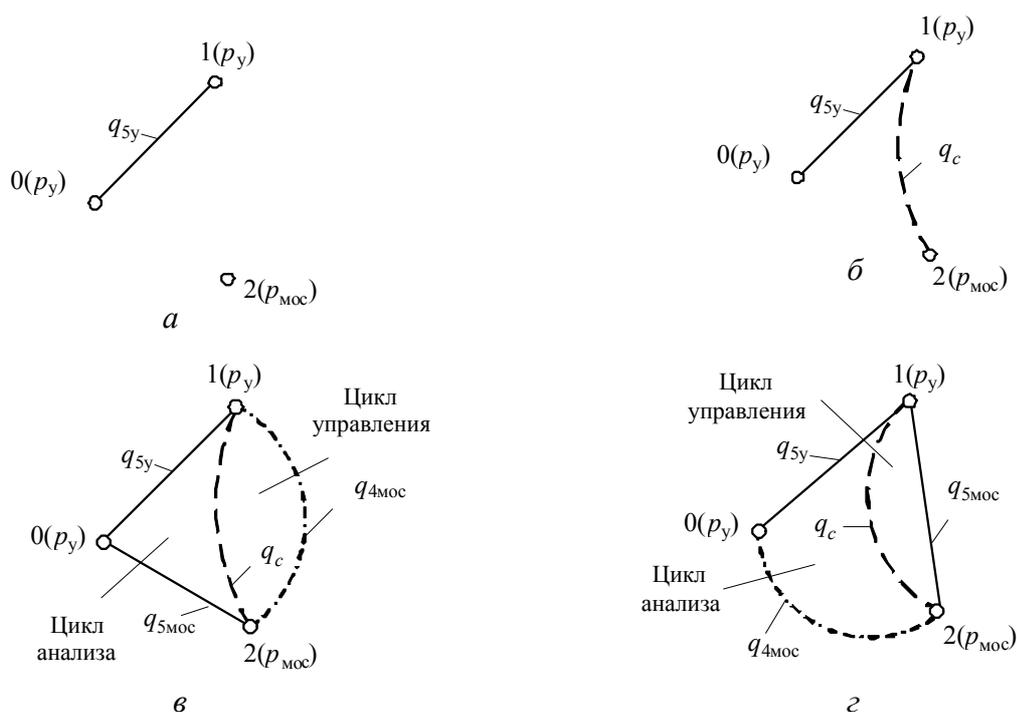


Рис. 2. Синтез КГ ПВУ с МОС: модель упругой части (а); расположение дуги упругой связи (б); формирование двух циклов с одной общей дугой (в, з)

Для того, чтобы построить требуемый КГ синтезируемого прототипа ПВУ с МОС, можно воспользоваться разработанными ранее принципами, определяющими синтез аналогичных устройств [5]. В соответствии с одним из них, дуга упругой связи в КГ устройства должна быть расположена между полюсами, соответствующими его подвижной части и звену обратной связи. Учитывая начальные условия построения, согласно которым в требуемом КГ имеется только один полюс обратной связи, положение данной дуги имеет только один вариант — между полюсами  $1(p_y)$  (подвижная часть устройства) и  $2(p_{\text{МОС}})$  (звено МОС) (рис. 2, б). Другой, из разработанных принципов синтеза ПВУ с МОС, обуславливает наличие КГ двух циклов с одной общей дугой, определяющей упругую связь. Именно это обстоятельство, учитывая количество полюсов и дуг в КГ, приводит к двум возможным решениям. В первом из них цикл анализа формируется дугами

$q_{5y} - q_{5\text{мос}} - q_c$ , а цикл управления —  $q_{4\text{мос}} - q_c$  (рис. 2, б). Во втором цикл анализа сформирован дугами  $q_{5y} - q_{4\text{мос}} - q_c$ , а цикл управления —  $q_{5\text{мос}} - q_c$  (рис. 2, в). С увеличением количества полюсов и дуг в кинематическом графе ПВУ с МОС неизбежно расширение множества возможных решений.

К настоящему времени еще не разработаны критерии выбора оптимального решения, тем не менее, развитие любого из полученных в результате построения КГ приводит к результату в виде прототипа ПВУ с МОС. Например, на основании КГ (рис. 2, в) алгоритм синтеза структурной схемы и прототипа устройства существенно упрощены (рис. 3).

На основании результатов проведенных исследований сделаны следующие выводы:

— кинематические графы являются эффективным средством для упрощения синтеза структурных схем ПВУ с МОС и позволяют с наименьшими временными затратами получить работоспособные прототипы аналогичных устройств.

— установленная взаимосвязь между количеством полюсов  $p_{\text{мос}}$  и дуг  $q_{5\text{мос}}$  в цикле управления кинематического графа ПВУ с МОС позволяет конкретизировать их количество при его построении в зависимости от исходных данных.

— при построении КГ ПВУ с кинематическими парами четвертого класса в структуре МОС возможна многовариантность решений, что адекватно многовариантности соответствующих конструктивных решений.

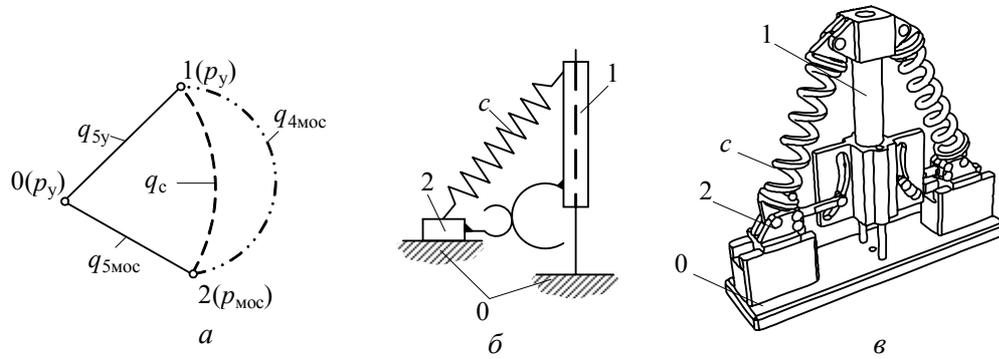


Рис. 3. Схема синтеза прототипа ПВУ с кинематической парой четвертого класса в структуре МОС: КГ (а); структурная схема (б); прототип (в)

Целью дальнейших исследований является развитие методики синтеза ПВУ с МОС с применением теории графов, а также повышение эффективности управления их упругими характеристиками. Для этого необходимо выполнить решение следующих научных и конструкторских задач:

— Разработать конструкции и исследовать упругие свойства предложенных прототипов ПВУ с МОС. Результаты исследований позволят путем сравнения с имеющимися аналогичными ПВУ с МОС оценить эффективность новых конструкций.

— Учитывая многовариантность возможных решений, необходимо разработать ряд критериев, позволяющих выделить из множества решения, близкие к оптимальным [6]. Данные проведенных исследований свидетельствуют о том, что возможными управляющими параметрами оптимизации могут стать: вид упругого элемента, определяющего упругую связь устройства, а также вид воздействия, определяющего изменение характеристики упругой связи.

Решение сформулированных научно-практических задач позволит обеспечить синтез ПВУ с МОС с расширенными функциональными возможностями.

## Литература

1. Сидоренко, І. Структура і класифікаційні ознаки пасивних віброізолюючих пристроїв з механічним зворотним зв'язком / І. Сидоренко // *Машинознавство*. — Львів: КІНПАТРІ ЛТД, 2006. — № 12. — С. 24 — 28.
2. Сидоренко, І.І. Вимушені коливання механічної системи з двома ділянками комбінованої пружної характеристики / І.І. Сидоренко, С.С. Гутиря // *Вісн. Східноукр. ун-ту*. — Луганськ: СНУ, 2008. — Вип. 6 (124), ч. 2. — С. 77 — 83.

3. Сидоренко, И.И. Свободные колебания пассивных виброизолирующих устройств с механической обратной связью / И.И. Сидоренко, С.С. Гутыря, П.Л. Носко // Вісн. Східноукр. ун-ту. — Луганськ: СНУ, 2008. — Вип. 6 (124), ч. 2. — С. 29 — 36.
4. Амбарцумянц, Р.В. Графы и механизмы: Моногр. / Р. В. Амбарцумянц. — Одесса: Полиграф, 2007. — 114 с.
5. Сидоренко, І. Синтез пасивних віброізолюючих пристроїв з використанням теорії графів / І. Сидоренко // Дев'ятий міжнар. симпозіум укр. інженерів-механіків у Львові: Праці. — Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2009. — С. 178 — 180.
6. Гутыря, С.С. Системное моделирование качества механизмов и машин / С.С. Гутыря // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 2003. — Вып. 2 (20). — С. 28 — 32.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Дашенко А.Ф.

Поступила в редакцию 1 сентября 2009 г.