

---

УДК 62.752

## **Вибрации и динамика машин: расчетные схемы, структуры и математические модели. Часть I**

Елисеев С.В., Трофимов А.Н., Большаков Р.С.

Обсуждаются некоторые методологические положения построения математических моделей в задачах динамики машин. Показано, что при всей сложности технических объектов, их формализованные модели в инженерной практике часто рассматриваются на уровне различных систем с относительно небольшим числом степеней свободы. Обзор методов в оценке свойств механических колебательных систем, которые широко используются в качестве расчетных схем различных технических объектов, позволяет более четко определиться с обобщенными представлениями о динамических процессах, которые реализуются в системах с обратными связями. Предлагается технология системного рассмотрения задач построения математических моделей в виде структурных схем эквивалентных в динамическом отношении систем автоматического управления. Определены направления развития способов и средств обеспечения вибрационной защиты объектов, что связано с расширением системы исходных понятий теории автоматического управления.

*Ключевые слова:* структурные модели виброзащитных систем, расширение набора типовых элементов, структурные преобразования, устройства для преобразования движения, рычажные связи и механизмы.

## **Machine vibrations and dynamics: design schemes, structures and mathematical models. Part I**

Eliseev S.V., Trofimov A.N., Bolshakov R.S.

Some of the methodological conditions of mathematical models in tasks of machines dynamics are discussed. It is shown that at all complexity of technical objects their formalized models in engineering practice often are considered abreast of systems with relatively of small number of degrees of freedom. Review of the methods in the estimation of properties of mechanical oscillation systems which are widely used as a design schemes of different technical objects, allows more clearly to determine the generalized representations about dynamical processes which are implemented in system with feedback ties. Technology of system consideration of tasks of constructions of mathematical models in form structure schemes equivalent in dynamical relation of automation control systems are offered. Directions of development of methods and means to ensuring the vibration protection objects are identified that associated with the expansion of the basic concepts of automation control theory. In first part is shown that design schemes of objects of transport dynamics at complication of technical objects begin to represent more advanced forms of dynamical interactions which creature new ties. Such ties is implemented as special constructional elements in form levers of different types, intermediate devices and large fragment of system.

*Keywords:* structure models of vibration protection systems, the extension of a typical elements set, structure transformations, movement transformation devices, lever connections and mechanisms.

### **Введение**

Теоретический базис современной механики машин представляет собой междисциплинарное пространство, в котором используются и находят применение методы теоретической механики, теории колебаний, теории автоматического управления, теории цепей,

теории механизмов и машин, робототехники, мехатроники [1÷4]. Отраслевая окраска задач динамики машин привносит существенные элементы специфики, требующей развития подходов, основанных на учете нелинейных эффектов и различных особенностей взаимодействия рабочих органов машин с внешней

средой. Большое значение имеет оценка и учет форм возмущающих воздействий внутренней и внешней природы. Разработанные системы нормативных документов (ГОСТы, международные стандарты, руководящие технические материалы и рекомендации, отраслевые методические материалы) закрепляют накопленный опыт в различных задачах динамики, в том числе, в решении задач теории и практики виброзащиты и позволяют вести поиск и разработку инновационных подходов [5÷7]. В последние годы существенное развитие получили направления, связанные с проблемами управляемых систем, реализующие в управлении колебаниями идеи введения обратных связей [7,8,9]. Использование обратных связей хорошо адаптируется на физическом уровне при рассмотрении колебательных движений в механических системах. Самоорганизация движений установившихся процессов при возмущениях, реакция систем на различные виды воздействий связаны с различными формами введения обратных связей. Теоретические аспекты проблемы введения в механические колебательные системы дополнительных связей и их реализация на основе использования специальных технических средств, потребляющих энергию внешних источников, нашли отражение в работах, посвященных активным виброзащитным системам [3,10]. Рассмотрение обратных связей на первом этапе становления представлений, связанных с формированием математических моделей в динамике механических колебательных систем, опирается на использование структурных методов исследования [3,4,7]. Теория автоматического управления, развивавшаяся со значительным опережением в отношении теоретической и прикладной механики, определила, в определенном смысле, выбор математического аппарата и направление исследований из разделов современной теории колебаний.

Целью статьи является развитие структурных представлений в построении математических моделей механических колебательных систем, и, в частности, виброзащитных систем. В ней рассматриваются особенности построения математических моделей в форме структурных схем эквивалентных в динамическом отношении систем автоматического управления. Все виды прямых, обратных перекрестных, в этом случае, имеют физическую интерпретацию; внешние воздействия (силовые и кинематические) соответствуют входным сигналам, а параметры состояния объекта защиты – выходными сигналами.

### **I. Особенности задач транспортной динамики**

Задачи защиты машин и оборудования от вибраций и ударов особенно характерны для динамики транспортных систем, хотя отраслевая специфика, в общем случае, нивелируется в обобщенных задачах виброзащиты и виброизоляции, как это представлено в [3,11].

Объекты транспортной динамики представляют собой достаточно сложные технические системы. Их разнообразные динамические свойства отражаются расчетными схемами различной сложности и соответствующими математическими моделями (рис. 1 и рис. 2). Приведенные схемы используются для выделения объекта защиты, системы основных составных элементов от внешних воздействий и для составления математических моделей виброзащитных систем (ВЗС). Математические модели, в виде системы дифференциальных уравнений, составляются на формализованной основе; используется принцип Даламбера или уравнения Лагранжа [3,11]. Поскольку технические объекты часто бывают сложными, то и набор рассматриваемых движений также достаточно обширен и разнообразен, поэтому можно говорить о существовании определенного иерархизированного класса моделей, отражающих различные свойства колебательных движений (Рис. 2).

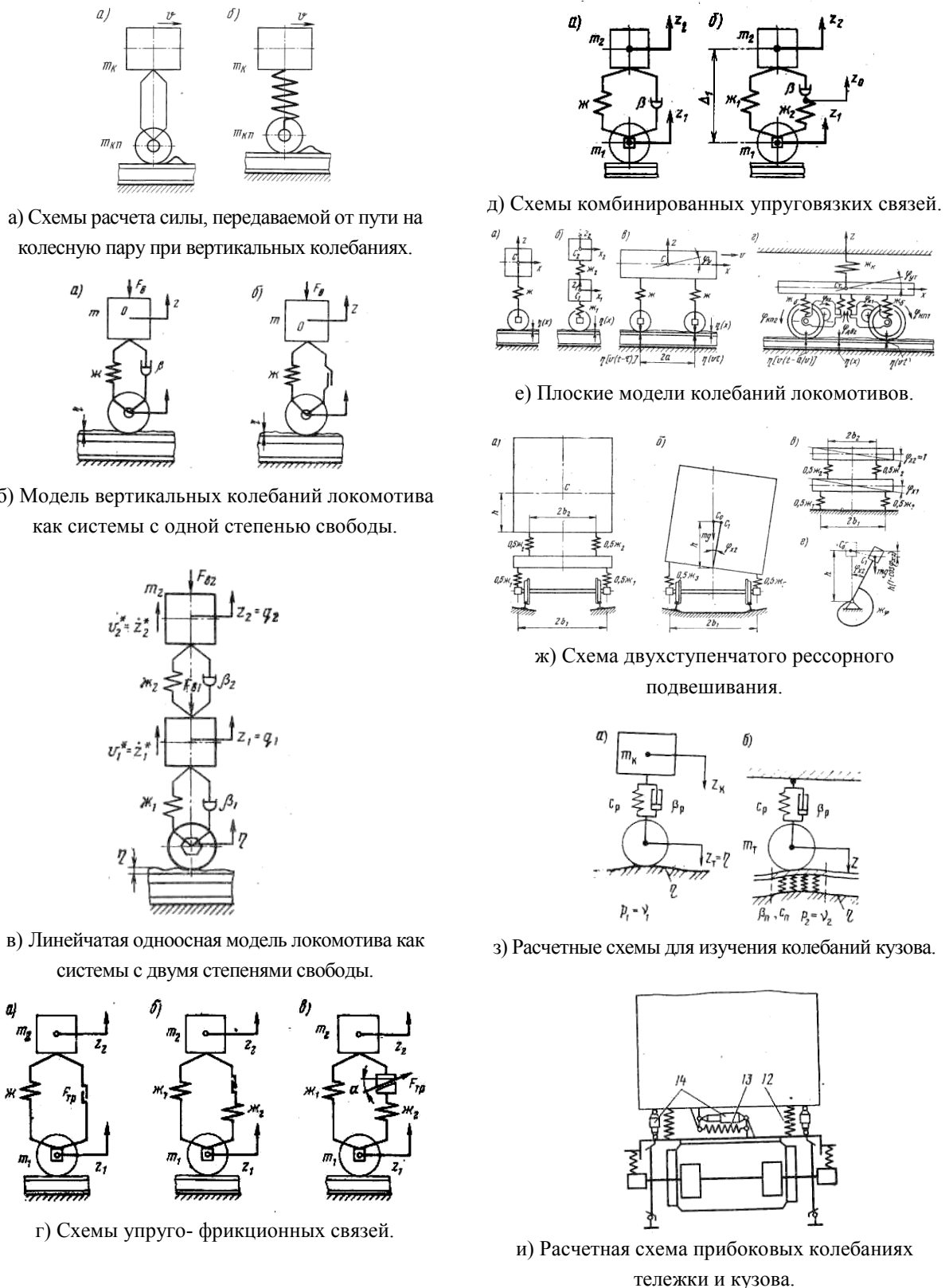


Рис. 1. Расчетные схемы в задачах транспортной динамики (пояснения по тексту).

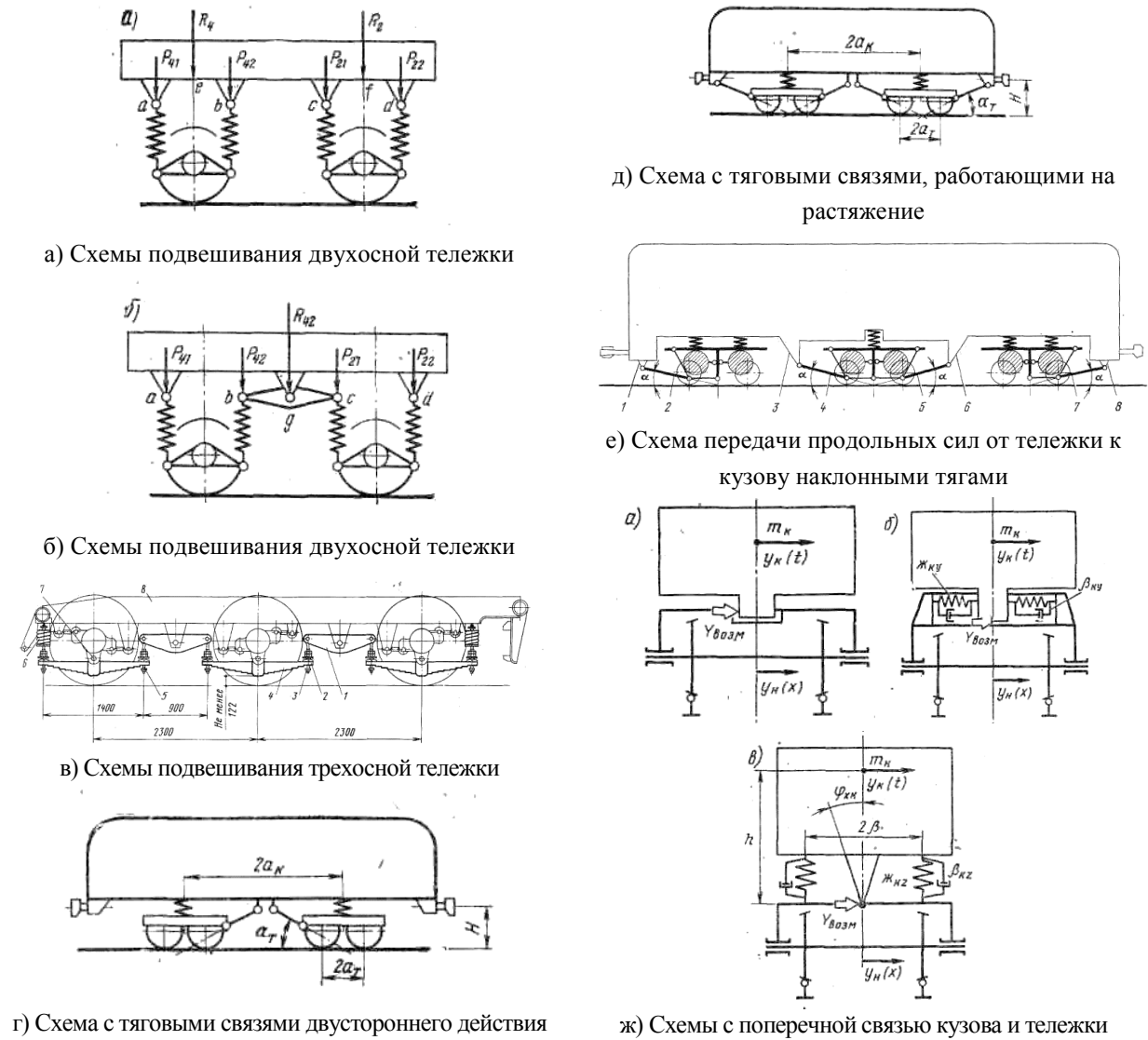


Рис. 2. Расчетные схемы с рычажными связями в задачах транспортной динамики (пояснения по тексту).

Транспортная динамика не является единственным направлением использования расчетных схем виброзащитных систем в виде колебательных механических структур с различными связями. Практически в любой отрасли производственной деятельности возникают задачи оценки уровня динамического состояния машин и оборудования, то есть оценки уровня их вибраций, поиска и разработки средств управления состоянием.

На представленном рисунке 1 приведены различные варианты расчетных схем в виде механических колебательных систем с одной, двумя и более степенями свободы. Хотя тех-

нические системы являются объектами с большим числом степеней свободы, неопределенность представлений о динамических взаимодействиях составных частей и значениях массоинерционных элементов и упругих характеристик связей снижают эффективность получения информации на основе сложных моделей, тогда как предварительный анализ структурирования исходного объекта и формирования подхода, основанного на последовательном рассмотрении усложняющихся систем (от схем на рис. 1а÷г к схемам на рис. 1д÷ж) может оказаться более целесообразным [12÷15].

Анализ расчетных схем объектов динамических взаимодействий, если иметь в виду, транспортные средства, приводит, в конечном итоге, к представлениям о том, что в структуре механических колебательных систем существенное значение приобретают рычажные связи и механизмы. Внимание к подобному рода вопросам стало заметно проявляться в последнее десятилетие в связи с разработкой теоретических аспектов динамических взаимодействий рычажных механизмов в структурах механических колебательных систем [4,7,14÷18].

На рис. 2(а÷ж) приведены расчетные схемы объектов транспортной динамики различной степени сложности. Рычажные механизмы в расчетных схемах (рис. 2а÷в) используются для образования механических цепей, соединения упругих элементов, что ориентировано на соответствующие изменения статических и динамических свойств систем. В расчетных схемах используются рычаги первого и второго рода, то есть с дифференциацией представлений о точках соединения рычага с корпусом (то есть расположения точки опоры), характером преобразования движений и усилий (рис. 2а÷е). В более развитой форме введение рычажных связей, как показано на рис. 2ж, позволяет создавать сложные формы взаимодействия элементов динамических систем, которые отличаются разнообразием физической природы связей и их пространственным расположением [19÷21].

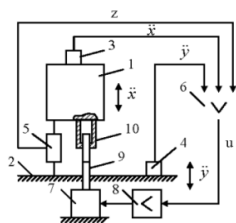
## II. Некоторые тенденции развития моделирования систем.

Большое разнообразие расчетных схем, реализуемых рычажными механизмами в задачах систем виброзащиты и необходимость обеспечения надежности и безопасности работы оборудования и аппаратуры, создают предпосылки развития теории виброзащитных систем в направлениях расширения набора типовых элементов расчетных схем и развития

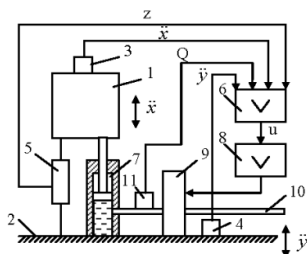
обобщенных подходов, опирающихся на структурные методы и представления теории автоматического управления. На рис. 3а÷г приведены принципиальные схемы виброзащитных систем, в структуре которых имеются внешние источники энергии, дающие возможность создания устройств для изменения параметров динамического состояния. На рис. 3а активное управляющее воздействие в механической системе реализуется на основе устройства для преобразования движения. В данном случае используется винтовой механизм: на гайку передается крутящий момент от двигателя, что приводит к движению винта, соединенного с объектом защиты. Параметры динамического состояния объекта защиты и параметров составляющих элементов измеряются; информация обрабатывается и формируется необходимое воздействие. Активная виброзащитная система имеет развитую конфигурацию обратных связей, обеспечивающих взаимодействие пассивной и активной частей ВЗС. Детализированное описание особенностей ВЗС можно найти в работах [3,10,14,17]. На рис. 3б аналогичная задача управления динамическим состоянием объекта защиты решается на основе использования электрогидравлического сервопривода. Большими возможностями обладают активные ВЗС с электромеханическими исполнительными механизмами, что нашло конструктивно-технические реализации в системах защиты вибростендов и приборного оборудования. На рис. 3г представлена принципиальная схема современной подвески сидения оператора на транспортных средствах, подверженных внешним динамическим нагрузкам. В подобного рода системах используются гидравлические амортизаторы, свойства которых могут изменяться с помощью автоматической системы управления [3,10,14].

Теория активных виброзащитных систем может рассматриваться как одно из направлений теории колебаний, в тех ее приложениях,

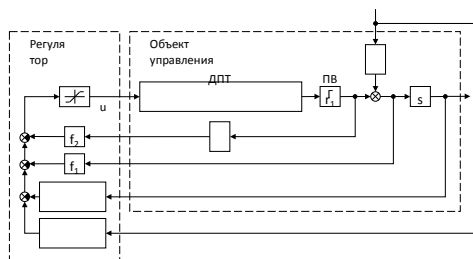
которые ориентированы на задачи динамики механических колебательных систем с дополнительными связями. Такие связи могут иметь различные физические формы, что предполагает наличие информационных составляющих, создаваемых системами измерения параметров состояния, обработки и реализации управляющих воздействий.



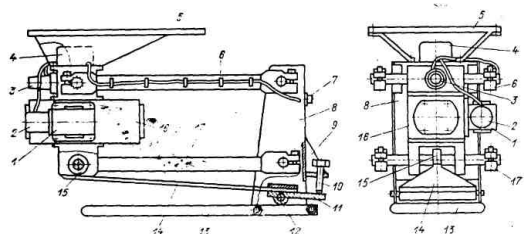
а) Схема с электромеханическим исполнительным механизмом с передаточной парой «винт-гайка»



б) Система с электрогидравлическим исполнительным механизмом



в) Структурная схема системы виброзащиты с электромеханическим исполнительным механизмом и частотным регулятором



г) Схема пассивной подвески сидения с гидроамортизатором, управляемым автоматически по электрическим каналам

Рис. 3. Виброзащитные системы с устройствами формирования активной силы (пояснения по тексту).

### III. Математические модели и подходы к их формированию.

В задачах оценки динамического состояния систем защиты от вибраций и ударов используются  $n$ -мерные цепные (или приводимые к ним) линеаризованные модели, которые чаще всего описываются матрично-векторными уравнениями второго порядка вида

$$\theta \ddot{\varphi} + B \dot{\varphi} + G \varphi = F(t), \quad (1)$$

где  $\varphi$  –  $n$ -мерный вектор обобщенных координат;  $\theta, B, G$  – симметрические матрицы, соответственно, инерционная, диссипативная и упругая;  $F(t)$  –  $n$ -мерная вектор-функция внешних воздействий.

Динамические системы многих машин и агрегатов, например, силовые передачи могут рассматриваться как системы с малой диссипацией. Во многих случаях матрица  $\theta$  является диагональной, а в тех случаях, когда  $\theta$  имеет структуру, отличную от диагональной, всегда можно посредством невырожденного, модального по отношению к исходной инерционной матрице преобразования, трансформировать систему (1) к виду с диагональной инерционной матрицей. Если в задачах виброзащиты, виброизоляции или управления динамическим состоянием объекта вводятся активные элементы, связанные с внешним источником энергии, то линеаризованная  $n$ -мерная модель со связями направленного действия может быть представлена матрично-векторным дифференциальным уравнением первого порядка в нормальной форме

$$\dot{x} = Ax + F(t), \quad (2)$$

где  $x$  –  $n$ -мерный вектор состояния (фазовых координат) модели;  $A$  – вещественная или комплексная  $(n \times n)$  матрица произвольной структуры;  $F(t)$  –  $n$ -мерная вектор-функция внешних воздействий.

Основное, в вычислительном плане, принципиальное отличие моделей (1) и (2) заключается в структурном характере их параметрических матриц: у цепных моделей матрицы

$\theta, B, G$  – симметрические, а у моделей с направленными связями (активными) матрица  $A$  характеризуется произвольной, в общем случае несимметрической и не приводимой к симметрической структурой. В тех случаях, когда система носит более сложный характер, то есть система не является цепочной, матрицы  $B$  и  $G$  могут становиться абсолютно плотными. Достаточно детализированное описание методических сторон таких подходов представлено в работе [11].

Структурные методы исследования, развиваемые в [3÷5,7,9], представляют собой оригинальное направление, основанное на использовании математических моделей в виде структурных схем и механических цепей, построенных с использованием типовых элементов, аналогичных тем, которые используются в теории автоматического управления, что стимулировало разработку методов автоматизированного исследования динамических систем. Развитие технологий вибрационной защиты и виброизоляции машин и оборудования

идет по пути превращения ВЗС, по существу, в системы автоматического управления. Общая тенденция заключается в том, что обратная связь в ВЗС вовлекает в свой состав не только первичные элементы (пружины, демпфера и другие), но и датчики, устройства для обработки информации, усилители, корректирующие цепи, регуляторы и исполнительные устройства в виде сервоприводов.

Отметим, как общую тенденцию, и усложнение самих систем управления ВЗС, которые в своих наиболее развитых формах реализуются как нейронные сети, используют эффекты адаптации и самоорганизации движения. При этом достаточно очевидным является сам факт интеграции технических средств, реализующих на практике сложные формы введения обратных связей. Важно отметить, что кроме обычных пружин и демпферов в рассмотрение вводятся колебательные структуры, механизмы преобразования движения, механические цепи, сервоприводы.



Рис. 4. Принципиальная схема связей основных понятий структурных подходов (пояснения по тексту).

- Звеньями обычного набора, подключаемые к объекту защиты в виде упруго-диссипативных и/или массо-инерционных элементов;
- Звеньями расширенного набора, добавляющими новые элементы: дифференцирующие, интегрирующие, «чистого запаздывания», пр.;
- Механическими цепями в качестве соединений: параллельных и/или последовательных элементов, доставляющих комбинации звеньям;
- Механизмами в качестве кинематических цепей (различного вида: от – двухзвенников до – многозвенных структур) в составе систем.
- Колебательными структурами в качестве динамических цепей (различного вида: от одной до нескольких степеней свободы).
- Сервомеханизмами (активными цепями с источниками энергии в виде различных приводов следящего принципа действия).

Рис. 5. Принципиальная схема: концепция обобщенных динамических связей в задачах вибрационной защиты.

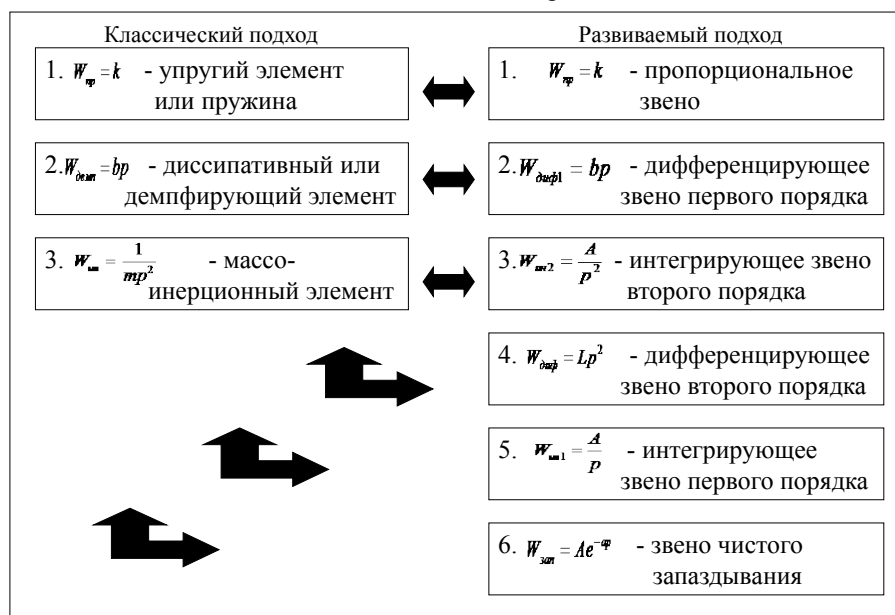


Рис. 6. Принципиальная схема соотношения элементов обычного и расширенного набора.

Принципиальные особенности структурного подхода представлены на рис. 4 в виде схемы взаимосвязи и взаимодействия некоторых операторов, характеризующих наборы определенных мероприятий. На этом же рисунке 4 (позиции а и б) показаны расчетная (рис. 4а) и структурная схемы (рис. 4б). Выражения (3)÷(5) на рис. 4 определяют связь между математической моделью (3) и структурным аналогом, то есть эквивалентной структурной схемой системы автоматического управления (рис. 4б). Выражения (4) и (5) определяют передаточные функции систем на

рис. 4б при кинематическом и силовом внешних сигналах. Передаточные функции могут быть получены также из математической модели (3) (рис. 4) после преобразований Лапласа ( $p = j\omega$  - комплексная переменная). Методическая основа структурных преобразований и приложения к системам с расширенным набором элементов, в том числе к системам с несколькими степенями свободы представлены работах [3÷5].

Развитие принципов обратной связи в приложении к динамике механических колебательных систем приводит к необходимости



введения понятия обобщенной динамической связи, которая по физической связи, представляет собой некоторую «обобщенную» пружину, вводимую параллельно упругому элементу в базовой модели. Последнюю в упрощенном виде можно представить как систему с одной степенью свободы (в виде объекта, опирающегося на пружину). Физическая реализация обобщенной динамической связи может быть разнообразной, однако, общим свойством является то, что в любом конструктивно-техническом варианте исполнения входным сигналом является смещение, а выходом – развиваемое или реализуемое усилие. Если в традиционном наборе элементов механической колебательной системы мы имеем три элемента (упругий, диссипативный элемент и системообразующее массоинерционное звено), то этот набор может быть существенно расширен (до шести позиций), как показано на рис. 5. Расширенный набор типовых элементов является основой для построения более сложных структур, представляющих собой комбинацию типовых элементов [3-5, 7, 9, 11].

Концепция структурных представлений основана на дальнейшем развитии подходов, получивших детализированную технологию преобразований исходных схем и определения откликов системы на типовые внешние воздействия, нашли отражение в работах по теории цепей и механических цепей в частности, а также в работах по теории автоматического управления [3÷5,11]. На рис. 5 представлена принципиальная схема, которая дает представление об алгоритмической основе структурного подхода, основная идея которого заключается в использовании возможностей структурных преобразований исходных схем с выделением необходимых точек для входных и выходных «сигналов». В таком случае возникает возможность ставить вопрос о формировании так называемой «динамической связи». Некоторые формы таких представлений развивались в работах [3÷5]. Особенность подходов

и приемов заключается в том, что преобразования и формирующиеся структуры имеют наглядную физическую интерпретацию. В частности, можно отметить, что все формы усложнений могут быть построены на использовании расширенного набора типовых элементов. Связь между обычными и предлагаемыми возможностями показана на принципиальной схеме на рис. 6.

Использование понятий о динамических связях приводит к естественным постановкам задач о способах их введения в структурные схемы и интерпретациях особенностей динамических взаимодействий типовых элементов и структурных преобразований в рамках локальных представлений о формировании математических моделей.

### Заключение

Таким образом сравнительный анализ развития теоретического базиса в рассмотрении способов и средств формирования и представления математических моделей технических объектов, подверженных вибрационным возмущениям, показывает определенные тенденции. Они заключаются в создании методических приемов постепенного усложнения расчетных схем и соответствующих математических моделей. Усложнение технических объектов влияет на сложность средств защиты от вибрационных воздействий и приближает виброзащитную технику к системам автоматического контроля и управления динамическим состоянием. Ориентация на методы активного управления состоянием создает предпосылки развития структурных методов исследования динамических свойств. В рамках таких подходов широко используется аналитический аппарат теории автоматического управления.

Набор типовых элементов виброзащитных систем также расширяется за счет разработки возможности введения звеньев более сложной природы, что стимулирует, соответствующим образом, математический аппарат.

В продолжении статьи (то есть ее второй части) показано, что при безусловно позитивных тенденциях развития методов вычислительного моделирования, позволяющих вести оценку динамического состояния сложных технических объектов, существенное значение имеют и подходы, ориентированные на поиск и оценку определенных закономерностей, проявляющихся в формировании динамических связей. Такие представления, в частности, связаны с возможностями расширения набора типовых элементарных звеньев, определения особенностей и ограничений, возникающих при формировании рычажных связей. В целом, представляется целесообразным развитие концептуальных основ восприятия механических колебательных систем, рассматриваемых на уровне взаимодействия крупных блоков, структур или образований из типовых элементов, отображаемых через соединения квазиэлементов или квазиструктур, что при определенных условиях достаточно четко проявляется в многообразных системах.

Прилагаемая ниже библиография связана только с той частью статьи. В случае необходимости во второй части статьи ссылки на соответствующие работы могут быть повторены. Исследования выполнены по гранту в рамках федеральной целевой программы «Научные и педагогические кадры инновационной России» на 2012 – 2013 г.г. (XLVII. Мероприятие 1.3.2. – естественные науки) № 14.132.21.1362., «Мехатроника виброзащитных систем», а также в рамках госбюджетных НИР ИрГУПС, тема: «Мехатронные подходы в задачах вибрационной защиты высокотехнологического оборудования и машин», номер государственной регистрации 01201352793.

### Литература

1. *Махутов Н.А.* Современные тенденции развития научных исследований по проблемам машиноведения и машиностроения [Текст] / Н.А. Махутов, В.П. Петров, В.И. Куксова, Г.В. Москвитин

// Проблемы машиностроения и автоматизации, 2008, №3. – С. 3-19.

2. Динамические взаимодействия элементов машин: расчетные схемы и математические модели вибрационных состояний / *Елисеев С.В., Артюнин А.И., Логунов А.С., Насников Д.Н., Большаков Р.С., Каимов Е.В., Миронов А.С., Паришута Е.А.*; Иркут. гос. ун-т путей сообщ. – Иркутск, 2013. – 319 с. – Библиогр.: 178 назв. – Рус. – Деп. в ВИНТИ 08.11.13 № 313 – В 2013.

3. *Елисеев С.В., Резник Ю.И., Хоменко А.П.* Мехатронные подходы в динамике механических колебательных систем. – Новосибирск: Наука, 2011. – 394 с.

4. *Белокобыльский С.В., Елисеев С.В., Кашуба В.В.* Прикладные задачи структурной теории виброзащитных систем. – СПб: Политехника, 2013. – 374 с.

5. *Елисеев С.В.* Концепция обратной связи в динамике механических систем и динамическое гашение колебаний [Электронный ресурс] / С.В. Елисеев, А.Н. Трофимов, Р.С. Большаков, А.А. Савченко // *technomag.edu.ru*: Наука и образование: электронное научно-техническое издание. №5. 2012. URL. [http:// technomag.edu.ru/doc/378353.html](http://technomag.edu.ru/doc/378353.html) (дата обращения: 10.05.2012).

6. *Белокобыльский С.В., Елисеев С.В., Ситов И.С.* Динамика механических систем. Рычажные и инерционно-упругие связи. – СПб: Политехника, 2013. – 320 с.

7. Динамика механических колебательных систем: структурные аналогии, механические цепи / *Елисеев С.В., Московских А.О., Каимов Е.В.*; Иркут. гос. ун-т путей сообщ. - Иркутск, 2013. – 116 с., ил.: – Библиогр.: 101 назв. – Рус. – Деп. в ВИНТИ 23.12.2013 № 378 В –2013.

8. *Емельянов С.В., Коровин С.К.* Новые типы обратной связи: управление при неопределенности. – М.: Наука. Физматлит. 1997. – 352 с.

9. *Елисеев С.В.* Возможности интеграции методов теории цепей и теории автоматического управления в задачах динамики машин [Электронный ресурс] / С.В. Елисеев, А.О. Московских, Р.С. Большаков, А.А. Савченко // *technomag.edu.ru*: Наука и образование: электронное научно-техническое издание. №6. 2012. URL. [http:// technomag.edu.ru/doc/ 378699.html](http://technomag.edu.ru/doc/378699.html) (дата обращения: 10.06.2012).

10. Кирюхин А.В. Активная виброзащита – назначение, принципы, состояние. Активная виброзащита и шумоизоляция трубопроводов и экспериментальные исследования [Текст] / А.В. Кирюхин, В.А. Тихонов, А.Г. Чистяков, В.В. Яблонский // Проблемы машиностроения и автоматизации, 2012, №4. – С. 102-110.
11. Хоменко А.П., Елисеев С.В., Ермошенко Ю.В. Системный анализ и математическое моделирование в мехатронике виброзащитных систем. – Иркутск: ИрГУПС, 2012. – 288 с.
12. Хохлов А.А. Динамика сложных механических систем. – М.: МИИТ, 2002. – 172 с.
13. Хоменко А.П. Динамика и управление в задачах виброзащиты и виброизоляции подвижных объектов. – Иркутск: ИГУ, 2000. – 293 с.
14. Современные проблемы динамики машин. Защита от вибраций и ударов / Елисеев С.В., Хоменко А.П., Барсуков С.В. Иркут. гос. ун-т путей сообщ. – Иркутск, 2011. – 460 с. – Библиогр.: 23 назв. – Рус. – Деп. в ВИНТИ 21.03.11 № 135 – В 2011
15. Варгунин В.Н. Конструирование и расчет рычажно-шарнирных средств и агрегатов / В.Н. Варгунин, В.Н. Гусаров, Б.Г. Иванов, А.С. Левченко [и др.]; под ред О.П. Мулюкина. – Самара: СамГУПС, – 2006. – 86 с.
16. Иванов Б.Г. Разработка методов расчета динамики и прочности агрегатов транспортной техники с рычажно-шарнирными связями: автореф. дисс. докт. техн. наук. – Самара. 2007. – 48 с.
17. Лаврусь В.В. Совершенствование пневматических рычажно-шарнирных систем железнодорожного транспорта: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. В. Лаврусь. – Орел, 2006. – 20 с.
18. Елисеев С.В., Кашуба В.Б., Ермошенко Ю.В. Рычажные связи в задачах динамики транспортной подвески // Системы. Методы. Технологии, 2011, № 9. – С. 24-31
19. Рычажные связи в задачах динамики механических колебательных систем. Теоретические аспекты / Елисеев С.В., Белокобыльский С.В., Упырь Р.Ю., Гозбенко В.Е. Иркут. гос. ун-т путей сообщ. – Иркутск, 2011. – 460 с. – Библиогр.: 15 назв. – Рус. – Деп. в ВИНТИ 27.11.09 № 737 – В 2009.
20. Елисеев С.В., Упырь Р.Ю., Логунов А.С. Рычажные связи в двумерных механических системах // Сб. научных трудов. Серия машиностроение, строительство. – Полтава, 2009. – С. 90-98.
21. Механизмы в упругих колебательных системах: особенности учета динамических свойств, задачи вибрационной защиты машин, приборов и оборудования / Хоменко А.П., Елисеев С.В., Артюнин А.И., Паршута Е.А., Каимов Е.В.; Иркут. гос. ун-т путей сообщ. – Иркутск, 2013. – 187 с. – Библиогр. 20 назв. – Рус. – Деп. в ВИНТИ 15.08.13 № 243 – В 2013.

## References

1. Makhutov N.A. Sovremennye tendencii razvitiya nauchnyh issledovanij po problemam mashinovedeniya i mashinostroeniya [Modern tendencies of develop of scientific research on engineering and mechanical engineering] / N.A. Makhutov, V.P. Petrov, V.I. Kuksova, G.V. Moslvitin // Problems engineering and automatization, 2008, №3. – p. 3-19.
2. Dinamicheskie vzaimodejstvija jelementov mashin: raschetnye shemy i matematicheskie modeli vibracionnyh sostojanij [Dynamical interactions of machines elements: design schemes and mathematical models of vibration conditions] / Eliseev S.V., Artyunin A.I., Logunov A.S., Nasnikov D.N., Bolshakov R.S., Kaimov E.V., Mironov A.S., Parshuta E.A.; Irkutsk state Transport university – Irkutsk, 2013. – 319 p. – Bibliog.: 178 names. – Rus. – Dep. in VINITI 08.11.13 № 313 – V 2013.
3. Eliseev S.V., Reznik Y.N., Khomenko A.P. Mehatronnye podhody v dinamike mehanicheskikh kolebatel'nyh sistem [Mechatronics approaches in dynamics of mechanical oscillation systems]. – Novosibirsk: Science, 2011. – 394 p.
4. Belokobilskii S.V., Eliseev S.V., Kashuba V.B. Prikladnye zadachi strukturnoj teorii vibrozashhitnyh sistem [Applied tasks of structural theory of vibroprotection systems]. – SPb: Politehnika, 2013. – 374 p.
5. Eliseev S.V. Koncepcija obratnoj svyazi v dinamike mehanicheskikh sistem i dinamicheskoe gashenie kolebanij [Concept of feedback tie in dynamics of mechanical oscillation systems and dynamical absorption of oscillations] [Internet resource] / S.V. Eliseev, A.N. Trofimov, R.S. Bolshakov, A.A. Savchenko // technomag.edu.ru: Science and education: internet science technical edition. #5. 2012. URL. <http://technomag.edu.ru/doc/378353.html> (data of treatment: 10.05.2012).

6. *Belokobil'skii S.V., Eliseev S.V., Sitov I.S.* Dinamika mehanicheskikh sistem. Rychazhnyye i inercionno-uprugie svyazi [Dynamics of mechanical systems. Lever and inertial elastical ties]. – SPb: Politehnika, 2013. – 324 p.
7. Dinamika mehanicheskikh kolebatel'nykh sistem: strukturnye analogii, mehanicheskie cepi [Dynamics of mechanical oscillation systems: structural analogies, mechanical chains] / *Eliseev S.V., Moskovskikh A.O., Kaimov E.V.*; Irkutsk state Transport university. – Irkutsk, 2013. – 116 p. – Bibliog.: 101 names – Rus. – Dep. in VINITI 23.12.2013 № 378 V-2013.
8. *Emelianov S.V., Korovin S.K.* Novye tipy obratnoj svyazi: upravlenie pri neopredelennosti [New types of feedback tie: control at uncertainty]. – Moscow: Science. Phismathlit, 1997. – 352 p.
9. *Eliseev S.V.* Vozmozhnosti integracii metodov teorii cepej i teorii avtomaticheskogo upravlenija v zadachah dinamiki mashin [Possibilities of integration of methods of theory of chains and automation control theory in tasks of machines dynamics] / *S.V. Eliseev, A.O. Moskovskikh, R.S. Bolshakov, A.A. Savchenko* // technomag.edu.ru: Science and education: internet science technical edition. #6. 2012. URL. <http://technomag.edu.ru/doc/378699.html>.
10. *Kiryukhin A.V.* Aktivnaja vibrozashhita – naznachenie, principy, sostojanie. Aktivnaja vibrozashhita i shumozoljacija truboprovodov i jeksperimental'nye issledovanija [Active vibroprotection – function, principles, condition. Active vibroprotection and noise insulation of pipeline and experimental research] / *A.V. Kiryukhin, V.A. Tikhonov, A.G. Chistiakov, V.V. Iablonskii* // Problems engineering and automatization, 2012, №4. – p. 102-110.
11. *Khomenko A.P., Eliseev S.V., Ermoshenko Y.V.* Sistemnyj analiz i matematicheskoe modelirovanie v mehatronike vibroza-shhitnykh sistem [System analysis and mathematical modeling in mechatronics of vibroprotection systems]. – Irkutsk: IrSTU, 2012. – 288 p.
12. *Khokhlov A.A.* Dinamika slozhnykh mehanicheskikh sistem [Dynamics of complicated mechanical systems]. – Moscow: MIIT, 2002. – 172 p.
13. *Khomenko A.P.* Dinamika i upravlenie v zadachah vibrozashhity i vibrozoljicii podvizhnykh ob'ektov [Dynamics and control in tasks of vibroprotection and vibroisolation of mobile objects]. – Irkutsk: ISU, 2000. – 293 p.
14. Sovremennye problemy dinamiki mashin. Zashhita ot vibracij i udarov [Modern problems of machines dynamics. Protection from vibrations and shocks] / *Eliseev S.V., Khomenko A.P., Barsukov S.V.* Irkutsk state Transport university – Irkutsk, 2011. – 460 p. – Bibliog.: 23 names. – Rus. – Dep. in VINITI 21.03.11 № 135 – V 2011.
15. *Varguninin V.N.* Konstruirovanie i raschet rychazhno-sharnirnykh sredstv i agregatov [Construction and calculation of lever-articulated vehicles and aggregates] / *V.N. Varguninin, V.N. Gusarov, B.G. Ivanov, A.S. Levchenko* [and others]; edited *O.P. Mulyukin*. – Samara: SamGUPS, 2006. – 86 p.
16. *Ivanov B.G.* Razrabotka metodov rascheta dinamiki i prochnosti agregatov transportnoj tehniki s rychazhno-sharnirnymi svyazjami [Development of methods of accounting of dynamics and strength of aggregates of transport technics with lever-articulated ties]: avtoref. diss. doct. tech. sc. – Samara, 2007. – 48 p.
17. *Lavrus V.V.* Sovershenstvovanie pnevmaticheskikh rychazhno-sharnirnykh sistem zheleznodorozh-nogo transporta [Improvement of pneumatic lever-articulated systems of railway transport]: avtoref. diss. doct. tech. sc. / *V.V. Lavrus*. – Orel, 2006. – 20 p.
18. *Eliseev S.V., Kashuba V.B., Ermoshenko Y.V.* Rychazhnyye svyazi v zadachah dinamiki transportnoj podveski [Lever ties in tasks of dynamics of transport of suspension] // Systems. Methods. Technologies, 2011, №9. – p. 24-31.
19. Rychazhnyye svyazi v zadachah dinamiki mehanicheskikh kolebatel'nykh sistem. Teoreticheskie aspekty [Lever ties in tasks of dynamics of mechanical oscillation systems. Theoretical aspects] / *Eliseev S.V., Belokobil'skii S.V., Upir R.Y., Gozbenko V.E.* Irkutsk state Transport university – Irkutsk, 2011. – 158 p. – Bibliog.: 15 names. – Rus. – Dep. in VINITI 27.11.09 № 737 – V 2009.
20. *Eliseev S.V., Upir R.Y., Logunov A.S.* Rychazhnyye svyazi v dvumernykh mehanicheskikh sistemah [Lever ties in two-dimensional mechanical systems] / Dg. of science of proceedings. Serie mechanical engineering, constructing. – Poltava, 2009. – p. 90-98.

21. Mehanizmy v uprugih kolebatel'nyh sistemah: osobennosti ucheta dinamicheskikh svojstv, zadachi vibracionnoj zashhity mashin, priborov i oborudovaniya [Mechanisms in elastic oscillation systems: features of accounting of deynamical properties, tasks of vibraion protection of machines, devices and apparatus] / *Khomenko A.P., Eliseev S.V., Artyunin A.I., Parshuta E.A., Kaimov E.V.*; Irkutsk state Transport university – Irkutsk, 2013. – 187 p. – Bibliog.: 20 names. – Rus. – Dep. in VINITI 15.08.13 № 243 – V 2013.

**Статья поступила в редакцию 4 апреля 2014 г.**

---

*Елисеев Сергей Викторович* – доктор технических наук, директор НИИ современных технологий, системного анализа и моделирования ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный университет путей сообщения», г. Иркутск, Россия. E-mail: eliseev\_s@inbox.ru

*Трофимов Андрей Нарьевич* – кандидат технических наук, директор Инженерного центра ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный университет путей сообщения», г. Иркутск, Россия. E-mail: trofimov\_an@irgups.ru

*Большаков Роман Сергеевич* – младший научный сотрудник Научно-образовательного центра современных технологий, системного анализа и моделирования ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный университет путей сообщения», г. Иркутск, Россия. E-mail: bolshakov\_rs@mail.ru

---

*Eliseev Sergey Viktorovich* – Professor, Irkutsk State University of Railway Transport. E-mail: eliseev\_s@inbox.ru

*Trofimov Andrey Narjevich* – PhD, Irkutsk State University of Railway Transport. E-mail: trofimov\_an@irgups.ru

*Bolshakov Roman Sergeevich* – Junior Researcher, Irkutsk State University of Railway Transport. E-mail: bolshakov\_rs@mail.ru