Возможности интеграции методов теории цепей и теории автоматического управления в задачах динамики машин

06, июнь 2012

DOI: 10.7463/0612.0378699

Елисеев С. В., Московских А. О., Большаков Р. С., Савченко А. А.

УДК 621.534.833.886.6

Россия, НИИ современных технологий, системного анализа и моделирования,
Россия, Иркутский государственный университет путей сообщения
eliseev_s@inbox.ru

Введение. Работа машин обеспечивается взаимодействием технических систем, состоящих, в свою очередь, из элементов различной физической природы. В механизмах функциональных систем используются элементы электро-, гидро-, пневмоавтоматики; широко применяются электрические цепи, имеющие силовые электромагнитные устройства и приводы. Обеспечение надежности и безопасности машин в значительной степени зависит от рационального выбора и возможностей систем защиты оборудования, приборов и аппаратуры от внешних, в том числе, вибрационных воздействий. Современные машины чаще всего представляют собой автоматизированные комплексы, в которых выбор параметров, расчеты рациональных режимов, поиск и выбор вариантов решения задач в оптимизационных подходах, осуществляются на основе математического моделирования.

Математический аппарат теории автоматического управления оказался достаточно эффективным подходом для объединения в обобщенных структурных интерпретациях многих задач динамического взаимодействия, а операторные методы исследования и оценки динамических свойств систем при периодических воздействиях получили широкое распространение. Вместе с тем, существует обширный класс задач, связанный с учетом специфических свойств механических цепей, а также электрических цепей, использующих устройства для преобразования движения и энергии. Ряд вопросов методологического характера и конкретного математического обеспечения в решении задач, связанных с оценкой динамических свойств систем, получил свою опору в развитии принципов электромеханических аналогий и теории цепей [1, 2, 3].

К числу малоизученных можно отнести и вопросы сопрягаемости или стыкуемости структурных моделей, построенных на основе теории цепей и соответствующих моделей или структурных схем, используемых в теории автоматического управления. В связи с этим разработка методологических позиций в оценке возможностей, объединение структурных интерпретаций систем различной физической природы представляется актуальным научным направлением научных исследований не только в плане развития теоретических основ, но и для конкретных приложений в динамике современных машин (робототехника, вибродиагностика, мехатроника и др.).

В предлагаемой статье обсуждается метод построения математических моделей современных машин, оборудования и аппаратуры, объединяющих возможности аналитического аппарата теории цепей и теории автоматического управления движением. Авторами представлены некоторые результаты по развитию аппарата теории механических цепей для учета особенностей динамического взаимодействия звеньев с твердым телом, совершающим плоское движение, а также по обоснованию метода упрощения цепных структур на основе исключения промежуточных координат и изучение возникающих при этом особенностей механических цепей. Определенный интерес представляют исследования возможностей расширения понятий о соединениях элементов в механических цепях и разработка метода сочленения разнородных структурных схем, что может быть использовано при динамическом синтезе виброзащитных систем на основе введения электродинамических связей.

I. Общие положения. Хотя многие вопросы учета особенностей взаимодействия звеньев и устройств, в том числе, и электрической, пневматической и гидравлической природы в достаточной степени изучены, развитие общих подходов, отражающих свойства машин и оборудования с позиций теории автоматического управления, представляет интерес. Последнее связано с возможностями интеграции структурных подходов, используемых в различных приложениях, характерных для теории цепей и теории автоматического управления. В работах авторов [4÷6] показано, что базовая расчетная схема в виде системы с одной степенью свободы (рис. 1 *а, б*) может быть трансформирована в структурную схему эквивалентной в динамическом отношении системы автоматического управления. Связи, формируемые в системе автоматического управления (рис. 1 *в*), могут быть интерпретированы в дополнительные (рис. 2 *а, б*) и рассматриваться как некоторая механическая цепь. При этом базовая модель может содержать в своей минимальной по сложности конфигурации лишь упругое звено k (рис. 2 *а*).

Рис. 1. Расчетная схема (базовая) в виде механической системы с одной степенью свободы:

а) схема при полном наборе элементов; б) преобразованная схема; в) структурная схема системы

Рис. 2. Принципиальная схема расширения типового набора элементов механической системы:

а) введение дополнительных связей между подвижным основанием $W_{дон1}(p)$ и неподвижной основой $W_{дон2}(p)$;
б) дополнительные связи на структурной схеме базовой модели

Структурные отображения исходных расчетных схем, особенно для механических систем с несколькими степенями свободы, усложняются тем, что в разных системах обобщенных координат математические модели и передаточные функции могут иметь различную форму. В частности, в качестве обобщенных координат могут выступать суммы и разности других координат, что изменяет устоявшиеся представления о динамических свойствах систем в их реакциях на периодические внешние воздействия. Возможности таких представлений приведены на рис. 3, что позволяет ввести расширение некоторых понятий теории колебаний, в частности, это связано с введением понятия обобщенной пружины [1, 6].

Расчетная схема виброзащитной системы балочного типа

Структурная схема виброзащитной системы балочного типа при кинематическом возмущении

Расчетная схема ВЗС балочного типа с введенными типовыми звеньями

Расчетная схема исходной ВЗС при введении дополнительных типовых звеньев и рычажной связи

Расчетная схема ВЗС как системы с одной степенью свободы с введенной обобщенной пружиной

Расчетная схема ВЗС для вывода дифференциальных уравнений движения

ж)

Расчетная схема для ВЗС с приведением
парциального вращательного блока
к поступательному

Рис. 3. Расчетные схемы виброзащитных систем с двумя степенями свободы

Объекты динамики машин представляют собой достаточно сложные технические системы, особенно транспортные средства, расчетные схемы которых обычно рассматриваются в виде механических систем со многими степенями свободы и с включением устройств различной природы, в том числе, и механизмов с элементами электро-, гидро- и пневмоавтоматики. Это создает большое разнообразие форм математических моделей и инициирует развитие способов и средств упрощения их расчетных схем.

Решение сложных задач динамики машин, чаще всего, опирается на приемы расчленения задач на достаточно простые фрагменты, что реализуется во многих случаях через рассмотрение задач, связанных с определением и оценкой возможностей цепей механической и электрической природы. Теория цепей в этих случаях позволяет решать проблемы сопряжения и адекватного представления процессов взаимодействия элементов систем на основе принципа электромеханических аналогий [3].

Аппарат теории цепей достаточно развит для оценки возможностей взаимодействия сложной системы в рамках представлений о системах с объектами управления, что делает актуальным поиск и разработку общих подходов, создающих формализованную основу для технологий построения математических моделей для систем, содержащих разнородные элементы.

II. Методологические основы подхода. В отличие от известных пар аналогий «напряжение – сила, ток – скорость» и «ток – сила, напряжение – скорость» авторами предлагается расширить систему электромеханических аналогий [1, 2]. Уравнения движения динамической системы могут быть представлены в нескольких эквивалентных формах:

$$\frac{md^2y}{dt^2} + b\frac{dy}{dt} + ky = Q(t), \quad (1)$$

$$\frac{mdv}{dt} + bv + k \int v dt = Q(t) \quad (2)$$

$$ma + b \int a dt + k \iint a dt^2 = Q(t). \quad (3)$$

В изображениях Лапласа выражения (1)÷(3) принимают вид:

$$mp^2 \bar{y} + bp \bar{y} + k \bar{y} = \bar{Q}(p), \quad (4)$$

$$mp \bar{v} + b \bar{v} + \frac{k}{p} \bar{v} = \bar{Q}(p), \quad (5)$$

$$m \bar{a} + \frac{b}{p} \bar{a} + \frac{k}{p^2} \bar{a} = \bar{Q}(p). \quad (6)$$

На рис. 4 а, б, в показаны соответствующие уравнениям (4)÷(6) структурные схемы, которые являются эквивалентными по отношению к (1)÷(3), однако имеют отличия из-за разницы в связях между элементами.

Рис. 4. Структурные схемы системы, соответствующие: а) – уравнениям вида (1), (4);

б) – уравнениям вида (2), (5), где $\bar{v} = \frac{d\bar{y}}{dt} = p\bar{y}$;

в) – уравнениям вида (3), (6); где $\bar{a} = \frac{d\bar{v}}{dt} = p^2\bar{y}$

Для оценки видов взаимосвязи между параметрами преобразований элементов динамической системы разработана номограмма, которая устанавливает соотношения между параметрами возможных преобразований элементов динамической системы.

Авторами рассмотрены связи между параметрами электрических цепей и определено соответствие понятий комплексного сопротивления цепи передаточной функции системы. Последнее зависит от вида внешнего воздействия и находит отражение в выборе системы электромеханических аналогий. В простейшем случае в задачах виброзащиты и виброизоляции

объект защиты представляет элемент массой m в колебательной системе с одной степенью свободы и имеет два внешних возмущения (рис. 5 а). Структурный аналог (рис. 5 б) и эквивалентная механическая цепь (рис. 5 в) составляют основу для математического моделирования динамических процессов.

Рис. 5. Расчетная схема (а), структурный аналог (б) и дуальная механическая цепь (в) в обобщенной задаче виброзащиты и виброизоляции

Комплексное сопротивление определяется по схеме на рис. 5 в. Если сделать его инверсию, то можно найти передаточную функцию системы, связанную со схемой на рис. 5 б. Рассмотрены вопросы эквивалентных преобразований силовых факторов в механических системах; в частности, показано, что кинематическое воздействие приводится к силовому и наоборот. Особенности введения дополнительной колебательной цепи и связь соответствующих структурных отображений показаны на рис. 6 а, б, в, г.

Рис. 6. Расчетная схема в задаче виброзащиты (а) при дополнительной связи в виде колебательной структуры; б) – структурная схема обычной системы с двумя степенями свободы, в) – структурная схема при использовании блоков (парциальных подсистем); г) – механическая цепь

Используя структуры на рис. 6 б, в, можно соответственно определить передаточную функцию

$$W(p) = \frac{\bar{\delta}}{\bar{Q}} = \frac{m_1 p^2 + k_2 + k_3}{(m_1 p^2 + k + k_2)(m p^2 + k_2 + k_3) - k_2^2} \quad (7)$$

и комплексное сопротивление (рис. 6 г)

$$S(p) = \frac{\bar{Q}}{\bar{\delta}} = \frac{(m_1 p^2 + k_3)\hat{e}_2 + (m p^2 + k)(m_1 p^2 + k_2 + k_3)}{m_1 p^2 + k_2 + k_3}, \quad (8)$$

из которых следует, что (7) и (8) связаны соотношениями инверсии.

Рассмотрены особенности возможных структурных интерпретаций механической системы цепного вида с несколькими (n) степенями свободы (рис. 5). Такая система имеет структурную интерпретацию в виде, представленном на рис. 7.

Рис. 7. Структурное отображение механической цепи

Если выделить объект защиты в виде некоторого элемента, например, элемента массой m_3 , то цепь может быть свернута относительно m_3 слева и справа, формируя дуальные элементы большей сложности, соответствующие обобщенным пружинам, что позволяет, в ко-

нечном итоге, перейти к структурам, эквивалентных в динамическом отношении систем автоматического управления.

III. Метод исключения координат. Обобщенный метод преобразования механических цепей на основе введения в соединения промежуточных устройств. Рассмотрены вопросы построения математических моделей для механических цепей, элементами которых являются рычажные механизмы. Такие механизмы появляются в механических цепях при введении твердых тел, как новой разновидности элементарных звеньев. В электрических цепях такие ситуации возникают при введении в структуру цепей электромагнитных устройств, в частности, трансформаторов. Авторами предлагается метод построения механических цепей, основанный на детализации рассмотрения (расщеплении) точки соединения элементов и введении в схему соединения исходных звеньев промежуточного звена. Последовательность этапов усложнения рассмотрена на рис. 8 а, б, в.

Рис. 8. Последовательное соединение элементов цепи: а) принципиальная схема; б) принципиальная схема соединения через материальную точку; в) расчетная схема соединения элементов через материальную точку массой m

Такой подход предполагает построение и определение динамических реакций, что связано с использованием структурных моделей, приведенных на рис. 9. Рассмотрены случаи представления промежуточного устройства в виде материальной точки массой $m \neq 0$ при наличии упругих связей k и k_2 . Случай введения твердого тела в виде стержня ($m \rightarrow 0$) представлен на рис. 10 а, б. Исследования показывают, что форма рычажного взаимодействия обладает большим влиянием; при этом рычажные связи могут быть реализованы через рычажные механизмы первого и второго родов.

Рис. 9. Структурная схема системы, соответствующей схемам на рис.9в: а)общий вид; б) приведенные элементы; в) упрощенная приведенная схема

Рис. 10. Промежуточное устройство в виде твердого тела (весомый рычаг): а) принципиальная схема; б) рычаг второго рода с упругими элементами

Для проведения промежуточных расчетов используются дифференциальные уравнения взаимодействия элементов, построенные на основе формализма Лагранжа, и соответствующие структурные схемы эквивалентных в динамическом отношении систем автоматического управления (САУ). Исследована система частных случаев расположения точек опоры рычагов и влияние величины передаточного отношения рычажного механизма $-i$. Учет массоинерционных свойств промежуточного устройства зависит от места расположения опоры, что проявляется через форму передаточной функции системы приведения. На рис. 11 представлены различные варианты расчетных схем, через которые реализуется последовательное соединение в механической цепи при наличии в соединении таких элементов механической цепи как твердое тело.

В частных случаях представлений особенностей промежуточных устройств используются структурные схемы, как показано на рис. 12 а, б, на которых нашли отражение зависимости свойств системы от частоты внешнего воздействия и передаточного отношения рычага. Отметим, что передаточные отношения могут принимать экстремальные значения. Введение твердого тела в структуру механической цепи приводит к существенному изменению ее свойств

систем в целом, что проявляется, в первую очередь, через метрику системы, поскольку в механической цепи появляются параллельные дополнительные ветви, а система перестает быть однородной. Аналогичная ситуация наблюдается в электрических цепях при введении трансформаторов, что приводит к нарушению гальванической цельности цепи, а ее элементы соединяются через электромагнитное поле. Рычажные механизмы играют такую же роль в механических цепях, при этом динамические свойства в цепи зависят от массоинерционных свойств рычага, его типа и условий закрепления точек опоры. Авторами предлагается методика оценки динамических взаимодействий между парциальными системами в механических системах цепного типа с несколькими степенями свободы на основе исключения промежуточных координат [4]. Наличие непланарной связи k_5 усложняет структуру системы.

Рис. 11. Варианты расположения точки контактов двух типовых элементов K_2 и K_3 при использовании рычажных связей

В окончательном виде механическая цепь приведена на рис. 12. Таким образом, введение твердых тел как звеньев механических цепей приводит к изменениям представлений о цепях в целом и механических цепях, в частности, и необходимости учета такого обстоятельства

как появление «метрики» цепи. Последнее связано с формированием дополнительных ветвей и использованием звеньев более сложной структуры, чем обычные элементы в виде масс, пружин и демпферов.

Рис. 12. Структурная схема исходной системы с дополнительной связью k_5 с развязкой непланарности

IV. Некоторые приложения теоретических разработок. Один из подходов может быть реализован через свертывание механической цепи до дуального элемента в виде обобщенной пружины для каждой ветви, замыкающейся на объект защиты. Другой заключается в формировании структурной модели на основе принципов обратной связи. Последовательность процедур отражается на рис. 13.

Рис. 13. Последовательная схема преобразований цепной механической системы с двумя степенями свободы в виброзащитную систему объекта массой m_1

Как следует из рис. 13 а, механическая система имеет силовое возмущение Q , которое приложено к объекту защиты массой m_1 . Расчетная схема на рис. 13 а может быть упрощена до расчетной схемы на рис. 13 б. При введении «обобщенной пружины» ее жесткость k_{np} определяется выражением

$$k_{i\delta} = \frac{k_2(m_2 p^2 + k_3)}{m_2 p^2 + k_2 + k_3}. \quad (9)$$

В этом случае часть цепи сворачивается до некоторой структуры, передаточная функция которой может быть определена с использованием правил преобразования механических цепей (рис. 13 а). Имея выделенный объект массой m_1 , можно перейти, опираясь на известные приемы, к структурной схеме, эквивалентной САУ (рис. 13 з).

Таким образом, если при выборе расчетной схемы технического устройства в виде механической колебательной системы цепного вида, состоящей из r элементов, объект защиты (m_n) может быть выделен, то примыкающие к нему механические цепи могут быть упрощены до обобщенных пружин, на которые этот объект опирается, а сама модель упрощается путем исключения промежуточных координат.

При рассмотрении электромеханических систем используется ряд приемов, которые позволили получать возможности построения цепей единой структуры: электрической или механической (рис. 14 а, б, в, г).

з)

Рис. 14. Схемы единого механического аналога электромеханического устройства:
 а) – принципиальная схема; б) – детализированная расчетная схема; в) – детализированная структурная схема эквивалентной САУ; г) – приведенная структурная схема

При построении механического аналога электромеханической цепи, в конечном итоге, электромеханическая система может быть сведена к расчетной схеме, как показано на рис. 15. В этом случае приведенная жесткость обобщенной пружины принимает вид:

$$k_{np}(p) = \frac{(m_1 p^2 + h_1 p) B l p}{m_1 p^2 + p(h_1 + B l)}. \quad (10)$$

Рис. 15. Приведенная расчетная схема (а) электромеханической системы на основе механических аналогов элементов; структурная схема системы (б)

Найдем передаточную функцию системы с переносом силы:

$$W_2'(p) = \frac{\bar{y}}{\bar{Q}_1} = \frac{1}{M p^2 + p(h + B l) + k + k_{np}}, \quad (11)$$

то есть контур с элементом m_1 , отражающий свойства индуктивности L , становится дополнительной обратной связью в контуре с элементом M , который выделен в качестве объекта управления (или виброзащиты). Для эквивалентного переноса сил, что связано с необходимостью структурных преобразований, авторами предлагается прием, основанный на использовании совпадений передаточных функций. Это позволяет переносить внешнюю силу из одной точки системы в другую.

Отметим, что электрическая природа цепи в электромеханической системе может давать ряд дополнительных динамических режимов. Если обеспечить связь механической и электрической систем через устройство, которое определяет зависимость напряжения от параметров динамического состояния объекта, то можно получить активную виброзащитную систему, как показано на рис. 16.

Рис. 16. Структурная схема ВЗС со связью по абсолютному отклонению

Передаточная функция системы в этом случае имеет вид:

$$W_{abc}(p) = \frac{\bar{y}}{\bar{z}} = \frac{k + hp + \frac{(Bl)^2 p}{Lp + R}}{mp^2 + hp + k \mp W_{ynp}(p) + \frac{B^2 l^2 p}{Lp + R}} = \quad (12)$$

$$= \frac{Lp^2(hL) + p(kL + B^2 l^2 + Rh) + Rk}{(Lp + R)(mp^2 + hp + k \pm W_{ynp}(p) + B^2 b^2 p)},$$

где $W_{ynp}(p)$ записано таким образом, что позволяет учесть особенности положительных и отрицательных обратных связей. Структура цепи $W_{ynp}(p)$ содержит передаточные функции

$W_3 = \frac{Bl}{Lp + R}$, а также передаточные функции измерительной, усилительной цепей и устрой-

ства обработки информации. В первом приближении $W_{изм}(p)$ соответствует апериодическому звену общего вида

$$W_{ynp}(p) = \frac{c_2 p + b_2}{c_1 p + b_1}, \quad (13)$$

где c_1, b_1, c_2, b_2 – коэффициенты, зависящие от параметров измерительной цепи, закона управления и параметров усилительного устройства, что характерно для низкочастотной области воздействий.

С целью проверки адекватности отражения на основе структурных подходов особенностей динамических свойств электромеханических систем был построен макет виброопоры на основе горизонтального вибростенда. Принципиальная схема макета приведена на рис. 17.

Рис. 17. Принципиальная схема макета системы с электромагнитными связями

Для защиты стойки или основания – 7 от действия горизонтальных воздействий $Q(t)$, создаваемых источником – 1, расположенным на подвижной платформе – 2, в опоре одновременно используются системы пассивной и активной цепи виброзащиты. Пассивная система представлена упругим элементом – 3. Исполнительным элементом активной виброзащиты является электромагнит – 8, закрепленный между подвижной и неподвижной частями стенда – 2 и 5. Система активной защиты включает в себя датчик силы – 6, выходной сигнал которого усредняется на сумматоре, датчик Холла – 4, аналого-цифровые преобразователи – 11 и – 12, дискретный регулятор – 9 и широтно-импульсный модулятор – 10. Выбор типа активного элемента был сделан с учетом особенностей условий внешнего возмущения.

Для построения регулятора системы активной виброзащиты разработана математическая модель, описывающая преобразование входного сигнала (напряжение ШИМ $-U$) в регулируемую переменную (усредненный сигнал датчика силы f). Последовательность преобразований входного сигнала U (выход – 10) в регулируемую переменную y определяется процессами, протекающими в электрической, магнитной, механической и информационной (измерительной) цепях макета, что потребовало построения системы соответствующих математических моделей:

$$\bar{I} = \frac{k_1}{Tp + 1} \bar{U}; \quad (14)$$

$$\bar{x} = \frac{k_x}{p^2 + a_1 p + a_0} (\bar{Q} - cI^2), \quad (15)$$

$$\bar{f} = \frac{\tau p}{\tau p + 1} (k\bar{x} + dI^2), \quad (16)$$

где $k_1 = 1/R$; $T = L/R$, $a_1 = b/M$, $a_0 = k/M$, $d = N^2 \mu_0 S / 2\delta^2$. - являются параметрами механической, электрической и магнитной цепи.

Математическая модель (14)÷(16) может быть упрощена (в отношении нелинейных свойств) без существенной потери точности. Такой переход можно представить в несколько этапов. В частности, может быть осуществлен переход к модели усредненного значения напряженности магнитного поля. Входным сигналом для частных моделей (14)÷(16) является напряжение $U(t)$ широтно-импульсного модулятора (ШИМ). Если измерительную цепь датчика Холла синхронизировать с работой ШИМа, то датчик будет реагировать только на усредненное значение поля (т.е. без высокочастотных пульсаций). В этом случае (14) можно заменить выражением

$$H^* = \frac{k_i}{T_i p + 1} u, \quad (17)$$

где u – сигнал управления (рассчитываемый дискретным регулятором); H^* – усредненное значение напряженности магнитного поля; k_n и T_n – коэффициенты эквивалентной передаточной функции. Вместе с тем, линеаризация математической модели (14)÷(16) может быть распространена на нелинейность свойства «однополярности управления». Для устранения этого нелинейного свойства используется формирование управления с обеспечением постоянного подмагничивания.

Для проверки модели механической части макета снимались переходные процессы по силе y (усредненный сигнал с датчиков силы), полученные при ступенчатом входном воздействии $\bar{H}$. При расчете коэффициентов сигналы y и H были представлены дискретным (машинным) кодом, и поэтому оба сигнала измерялись в машинных единицах (м.е.).

Заключение. 1. Разработан метод построения математических моделей механических систем, содержащих в своей структуре звенья и элементы различной физической природы, позволяющий упростить построение моделей и создать основу предварительной оценки динамических свойств систем при действии вибрационных факторов.

2. Предложена методологическая основа и разработаны частные методики использования при построении математических моделей приемов и подходов теории цепей и теории авто-

математического управления, что позволило создавать единые в своей основе структуры, для изучения которых эффективны частотные методы анализа и динамического синтеза.

3. Изучены особенности формирования структуры математических моделей механических систем, в которых помимо обычных элементов используются звенья в виде твердых тел, совершающих плоское движение.

4. Разработан метод формирования цепных механических структур, содержащих звенья, формирующие рычажные связи. Предложена методика решения задач упрощения исходных механических систем, содержащих непланарные связи.

5. Разработана методика преобразования электромеханических систем с возможностями формирования единого метрического пространства, что достигается переходом от обычных схем аналогий к другим схемам, использующим в качестве переменных электромеханических систем не только скорости, но также смещение, ускорение и др. Последнее расширяет возможности построения математических моделей совмещенной природы.

Библиографический список

1. Елисеев С.В., Резник Ю.Н., Хоменко А.П. Мехатронные подходы в динамике механических систем. – Новосибирск.: Наука. – 2011. – 394 с.
2. Дружинский И.А. Механические цепи – Ленинград: Машиностроение, 1977. – 247 с.
3. Бакалов В.П., Дмитриков В.Ф., Крук Б.И. Основы теории цепей. – М.: Радио и связь. 1998. – 460 с.
4. Упырь Р.Ю., Московских А.О. Моделирование нового типа последовательного и параллельного соединения // Материалы IX школы-семинара «Математическое моделирование и информационные технологии». – Иркутск: Из-во ИДСТУ СО РАН.- 2007. – С. 55-63.
5. Московских А.О., Савченко А.А., Абросимова Ю.О. Электродинамические связи в механических колебательных системах // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование, 2011.- №3(31).- С. 73-81.
6. Елисеев С.В., Резник Ю.Н., Хоменко А.П., Засядко А.А. Динамический синтез в обобщенных задачах виброзащиты и виброизоляции технических объектов. – Иркутск.: Ирк. гос. университет. – 2008. – 523 с.

Integration possibilities of the chain theory methods and the automatic control theory in solving tasks of dynamics of machines

06, June 2012

DOI: [10.7463/0612.0378699](https://doi.org/10.7463/0612.0378699)

Eliseev S.V., Moskovskih A.O., Bolshakov R.S., Savchenko A.A.

Russia, Science educational center of Modern technologies, system analys and modeling,
Russia, Irkutsk State Transport University
eliseev_s@inbox.ru

Possibilities of creation of structural schemes of mechanical oscillation systems are considered in this article. The authors propose an integration method which combines possibilities of using principles of electromechanical analogies (mechanical chains) and rules of structure transformations with feedback coupling. A methodological base for evaluating dynamic properties of vibration protection systems with electromechanical couplings was proposed.

Publications with keywords: [structures schemes of mechanical oscillation systems](#), [transfer functions of systems](#), [complex impedances](#)

Publications with words: [structures schemes of mechanical oscillation systems](#), [transfer functions of systems](#), [complex impedances](#)

References

1. Eliseev S.V., Reznik Iu.N., Khomenko A.P. *Mekhatronnye podkhody v dinamike mekhanicheskikh system* [Mechatronic approaches in the dynamics of mechanical systems]. Novosibirsk, Nauka. 2011. 394 p.
2. Druzhinskii I.A. *Mekhanicheskie tsepi* [Mechanical chain]. Leningrad, Mashinostroenie, 1977. 247 p.
3. Bakalov V.P., Dmitrikov V.F., Kruk B.I. *Osnovy teorii tsepei* [Fundamentals of circuit theory]. Moscow, Radio i svyaz'. 1998. 460 p.
4. Upyr' R.Iu., Moskovskikh A.O. Modelirovanie novogo tipa posledovatel'nogo i parallel'nogo soedineniia [Simulation of a new type of series and parallel connections]. *Materialy 11-go shkoly-seminara «Matematicheskoe modelirovanie i informatsionnye tekhnologii»* [Proc. of the 11th School-Seminar "Mathematical modeling and information technology"]. Irkutsk, IDSTU SO RAN Publ., 2007, pp. 55-63.
5. Moskovskikh A.O., Savchenko A.A., Abrosimova Iu.O. Elektrodinamicheskie svyazi v mekhanicheskikh kolebatel'nykh sistemakh [Electrodynamic communication in mechanical oscillatory

systems]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling], 2011, no. 3(31), pp. 73-81.

6. Eliseev S.V., Reznik Iu.N., Khomenko A.P., Zasiadko A.A. *Dinamicheskii sintez v obobshchennykh zadachakh vibrozashchity i vibroizoliatsii tekhnicheskikh ob"ektov* [Dynamic synthesis of generalized problems in vibration protection and vibroinsulation of technical objects]. Irkutsk, ISU Publ., 2008. 523ps.