

## ЛИТЕРАТУРА

1. Остриков, О.М. Механика двойникования твердых тел / О.М. Остриков. – Монография. – Гомель: Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», 2008. – 301 с.
2. Tellinen, J. Basic properties of magnetic shape memory actuators / J. Tellinen, I. Suorsa, A. Jääskeläinen, I. Aaltio, K. Ullakko // AdaptaMat Ltd., Helsinki. Published in 8th Int. Conf. “Actuator 2002”, Germany. – 2002. – P. 4.
3. Chernenko, V.A. Giant two-way shape memory effect in high-temperature Ni-Mn-Ga single crystal / V.A. Chernenko, E. Villa, S. Besseghini, J.M. Barandiaran // 3rd Int. Symposium on Shape Mem. Mat. Smart Systems. – 2010. – P. 94–98.
4. Классен-Неклюдова, М.В. Механическое двойникование кристаллов / М.В. Классен-Неклюдова // Москва: АН СССР. – 1960. – С. 262.
5. Волчков, Ю.М. Механика деформируемого твердого тела (теория пластичности) / Ю.М. Волчков. – Новосибирск: НГУ, 2009. – 80 с.
6. Астафьев, В.И. Нелинейная механика разрушения / В.И. Астафьев, Ю.Н. Радаев, Л.В. Степанова // Самара: Изд-во «Самарский университет». – 2001. – 562 с.
7. Корн, Г. Справочник по математике. Для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн // М.: Наука. – 1973. – 832 с.

**УДК 60.001.11:531.8**

**Кудин В.В., Авсиевич А.М., Довнар С.С., Качанов И.В.**

### **КРИТЕРИИ ДИНАМИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА СЛОЖНОСОСТАВНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ИХ ПАРАМЕТРЫ**

*Белорусский национальный технический университет,*

*Минск, Беларусь*

*Представлены общие подходы к созданию структурной схемы и динамической модели сложносоставной технологической системы, объединяющей в себе элементы, обладающие различными свойствами и характеристиками. Рассмотрены критерии и факторы, определяющие надежность систем с точки зрения вибробезопасности. Показано, что обеспечение надежности и безопасности сложносоставных систем сводится к управлению инерционными, жесткостными и диссипативными параметрами их элементов.*

Понятие динамического качества систем и оборудования включает в себя комплексную оценку не только функциональных и потребительских свойств отдельных механизмов, устройств, подсистем, изделия или технологической системы, но и комплексных технологических и эксплуатационных их свойств с учетом влияния параметров внешней окружающей среды. При этом к оцениваемым параметрам отдельных элементов или системы в целом следует отнести кинематические характеристики, мощностные затраты, быстродействие, производительность, параметры, характеризующие колебательные процессы на различных технологических режимах работы. Комплексными характеристиками системы являются надежность, долговечность, ремонтпригодность, и, главное, стабильность показателей качества работы или реализуемого технологического процесса.

Весь перечисленный комплекс параметров динамического качества сложносоставных систем и оборудования может быть решен в рамках системного анализа [1].

Таким образом, сложносоставную систему или оборудование на любом уровне представляют сложные гетерогенные системы [2], различные части которых функционируют, используя различные физические законы, и обладают различными свойствами. Соединение двух разнородных систем в единую может приводить к двум прямо противоположным результатам. По разным критериям система может оказаться хуже или лучше, чем ее отдельные элементы и подсистемы.

Схему сложносоставной системы, включающей в себя в основном элементы, функционирующие на основе законов механики представим на рис. 1

Сложносоставная механическая система с элементами автоматического управления в структурном отношении может быть представлена в виде нескольких практически автономных условно простых систем  $C_1, C_2, \dots, C_n$ , которые взаимодействуют между собой, оказывают определенное влияние на качественные характеристики и состояние друг друга, а также на качественные показатели технологического процесса. При этом каждая из простых систем  $C_1, C_2, \dots, C_n$  состоит из подсистем  $ПС-1, ПС-2, \dots, ПС-N$ , взаимодействующих между собой формирующих состояние и определяющих качественные показатели системы.

Подсистемы  $ПС-1, ПС-2, \dots, ПС-N$  состоят из одного или нескольких механизмов, управляемых от электродвигателя, гидро- или пневмодвигателя, работающих по определенной программе, изменение параметров которой осуществляется обратной связью системы управления. Механизмы подсистемы собственно и являются источниками переменных факторов, вызывающих динамические нагрузки в несущих элементах подсистемы.

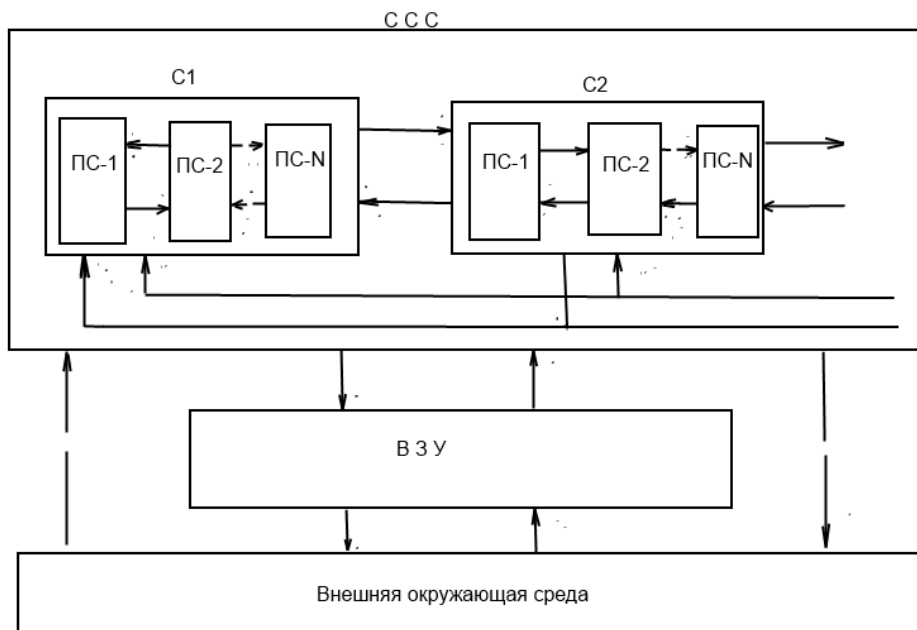


Рис. 1. Структурная схема сложносоставной системы

Таким образом, сложносоставная механическая система должна рассматриваться как многофакторная совокупность многосторонних взаимодействий динамических силовых полей несущих элементов входящих в нее систем и взаимодействующих между собой.

С другой стороны сложносоставная система взаимодействует с другими автономными системами и находится под воздействием факторов, которые формируют так называемую внешнюю окружающую среду. Эти взаимодействия и факторы воздействуют на простые системы  $C_1, C_2, \dots, C_n$  и могут существенно повлиять на состояние и качественные показатели системы в целом, а также на качественные показатели технологического процесса и санитарно-гигиенические условия. В связи с этим в структурную схему включается виброзащитное устройство (ВЗУ), предназначенное для отделения сложносоставной системы от воздействия внешней окружающей среды, а также для снижения воздействия системы на окружающую среду.

Виброзащитное устройство (ВЗУ) выполняет роль сложной динамической системы, предназначенной для того, чтобы не только разделить взаимодействующие системы, но и управлять этими взаимодействиями, как со стороны самой системы, так и со стороны внешней окружающей среды. Управляемый процесс взаимодействия этих систем позволит создать не только высокопроизводительное, высококачественное оборудование в составе сложной составной системы, но и безопасную среду, соответствующую в первую очередь высоким санитарно-гигиеническим требованиям к рабочему пространству оператора.

Динамическое качество механических систем определяется устойчивостью системы и характеристикой реакции системы на внешние возмущения. Динамическое качество системы предполагает комплексную оценку качества единой системы не только с позиций кинематических, динамических, конструктивных характеристик самой системы, но и оценку ее технологических и эксплуатационных свойств (надежности, безопасности, управляемости и т.д.) [2, 3].

Для правильного понимания динамического качества систем необходимо четко различать понятия динамических и рабочих процессов системы. Под динамическим процессом в системе понимается изменение параметров системы, в том числе параметров, характеризующих рабочие процессы на различных режимах работы (разгон, торможение, установившийся режим, реверсивный режим и т.д.). Рабочим процессом называется комплекс физико-химических явлений, протекающих в отдельном соединении (трение, резание, автоколебания и т.д.).

К основным показателям динамического качества сложносоставных систем относятся: надежность, степень устойчивости, степень безопасности, степень управляемости, быстродействие и т.д.

Надежность системы – это ее способность выполнять свои функции при сохранении структуры системы и ее основных динамических характеристик в течение срока эксплуатации. Надежность определяется характеристиками, носящими вероятностный или статистический характер [4,5]. Количественная мера надежности – это, например, величина и характер изменения контактных напряжений в сопряжениях, либо вероятность безотказной работы в предусмотренных условиях эксплуатации.

На временном интервале эксплуатации могут произойти три вида отказов:

- а) внезапный, вызванный непредсказуемыми событиями в системе;
- б) усталостные отказы, вызванные изменением физико-механических свойств элементов системы;
- в) комбинированные отказы, связанные как со старением элементов, так и с неожиданными событиями.

Степень (запас) устойчивости определяется возможностью изменения того или иного параметра системы без потери ею устойчивости. Устойчивость является характеристикой, относящейся прежде всего к движениям элементов системы, вызываемыми начальными возмущениями и внутренними свойствами системы. Удобно запас устойчивости выражать в параметрах частотной характеристики системы в форме запаса устойчивости по амплитуде или по фазе этой характеристики [6]. Степень устойчивости для рабочих машин, в частности обрабатывающих станков, определяется как способность рассеивать энергию, вносимую внешним воздействием.

В системах с автоматическим управлением устойчивость рассматривается как внутреннее их свойство, описываемое системой уравнений. Поэтому устойчивость рассматривается в терминах пространства состояний [2, 3].

Более точной эксплуатационной характеристикой, чем надежность, является безопасность системы. Безопасность – это вероятность того, что параметры режим функционирования системы не выйдут за проектные допустимые пределы в случае отказа какой-нибудь подсистемы сложносоставной системы. Эффективным путем повышения безопасности функционирования системы является мониторинг вибрационного состояния рабочих процессов в соединениях элементов, что требует создания подсистемы контроля, обеспечиваемого системой датчиков контроля вибрационного состояния, устройствами передачи информации и ее обработки с последующим принятием технического решения. Критерий оценки вероятности безопасности функционирования системы  $P(A)$  вычисляется на основе различных моделей аналитически или на основе статистического моделирования [2, 7].

Понятие управляемости системы связано с возможностью перевода системы посредством управления из одного состояния в другое. Этому понятию придается либо структурно-качественный, либо количественный смысл. При рассмотрении структурно-качественной стороны управляемости вызывает интерес принципиальная возможность перехода управляемой системы из одного заданного состояния в другое за конечный интервал времени. При количественном изучении управляемости рассматривают те или иные характеристики переходных процессов при простейших типовых управляющих воздействиях. Можно рассматривать управляемость как динамических объектов, так и систем, содержащих множество замкнутых контуров управления. Управляемость системы зависит от ее структуры, состава органов управления, значения параметров, располагаемой энергии управления.

Быстродействие системы определяет быстроту завершения переходных процессов и выражается продолжительностью процесса, иначе временем затухания переходных отклонений параметров системы до значений, меньших некоторой установленной величины. Между степенью устойчивости и быстродействием системы существует прямая связь.

Кроме приведенных критериев динамического качества систем, в необходимых случаях могут использоваться некоторые более специальные показатели, например вибробезопасность системы, влияние вибраций на точность позиционирования рабочего органа, критерии вибрационной и звуковой безопасности окружающей среды и т.д.

Параметры, по которым определяют критерии динамического качества системы, выбираются в соответствии с конкретными задачами и свойствами системы. При подборе двигателя или системы автоматического управления анализ проводится по параметрам процессов в двигателе (например, напряжение и ток в электродвигателе, расход жидкости в гидросистеме и т.п.). При выборе конструктивного варианта системы, например, станка, в качестве параметров оценки выбираются относительные смещения или скорости движения инструмента и заготовки, стола и направляющих, напряжений в звеньях привода и т.д. [2]. При выборе режимов движения исполнительных органов системы в качестве параметров выбирают перемещения точек позиционирования, виброскорости, виброперемещения, либо при энергетической оценке – виброускорения.

Особое внимание при выборе параметров сложносоставной системы следует уделить инерционным, упругим и диссипативным параметрам подсистем, систем и сложносоставной системы в целом при ее взаимодействии с окружающей средой [8]. В зависимости от поставленной задачи распределение этих параметров будет зависеть от тех динамической и математической модели, которые будут отображать реальную физическую систему. При этом может использоваться модель с сосредоточенными или распределенными параметрами или их комбинации [4]. К инерционным параметрам относятся массы и моменты инерции звеньев, определяемые для динамической модели системы из условия равенства кинетических энергий. Инерционные параметры формируют матрицу инерционных коэффициентов  $A_{ij}$ , где  $i, j = 1, 2, \dots, n$ . Элементы матрицы  $a_{ij}$  – инерционные коэффициенты, состоящие из масс и моментов инерции.

Упругие (жесткостные) параметры элементов системы возникают под воздействием внешних сил в виде линейных либо угловых перемещений сечений звена относительно друг друга. Упругие характеристики определяются жесткостными коэффициентами, образующими матрицу жесткости  $C_{ij}$ , где  $i, j = 1, 2, \dots, n$ . Элементами матрицы жесткости являются коэффициенты  $c_{ij}$ , определяемые для динамической модели из условия равенств потенциальных энергий [9]

$$\Pi = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{c_{ij}}{2} q_i q_j, \quad (1)$$

где  $q_i$  – обобщенная координата.

Диссипативные свойства упругих элементов системы характеризуются способностью рассеивать колебательную энергию. Принято считать, что при колебательном процессе диссипативные свойства упругой системы определяются коэффициентами сопротивления и в многостепенных системах формируют матрицу  $B_{ij}$ , где  $i, j = 1, 2, \dots, n$ . Элементами этой матрицы являются коэффициенты сопротивления, определяемые из условия равенства функции Релея

$$\Phi = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{b_{ij}}{2} \dot{q}_i \dot{q}_j, \quad (2)$$

где  $\dot{q}_i \dot{q}_j$  – производные обобщенных координат по времени.

Таким образом, параметры упруго-диссипативной системы зависят от структуры системы и конкретных механизмов подсистем, способов взаимодействия подсистем и систем. Все эти особенности в дальнейшем будут формировать динамическую и математическую модели сложносоставных механических систем.

Примером сложносоставной упруго-диссипативной системы является современный многоцелевой станок. На рис.2 показан крупногабаритный сверлильно-фрезерно-расточной станок с ЧПУ белорусского производителя ОАО «МЗОР». Здесь каждая помеченная часть является упруго-диссипативной подсистемой.

При конечно-элементном моделировании корпусу каждого помеченного объекта приписываются как упругие, так и диссипативные свойства. Энергия рассеивается также при скольжении по направляющим, для которых моделируется контактная податливость. Стойка движется по оси X продольно под управлением редуктора (упругое звено X). Внутри стойки поднимается и опускается каретка с помощью вибрирующего винта Y. Из каретки под действием винта Z выдвигается длинный ползун, несущий на конце шпиндельную головку ШГ с различными инструментами.

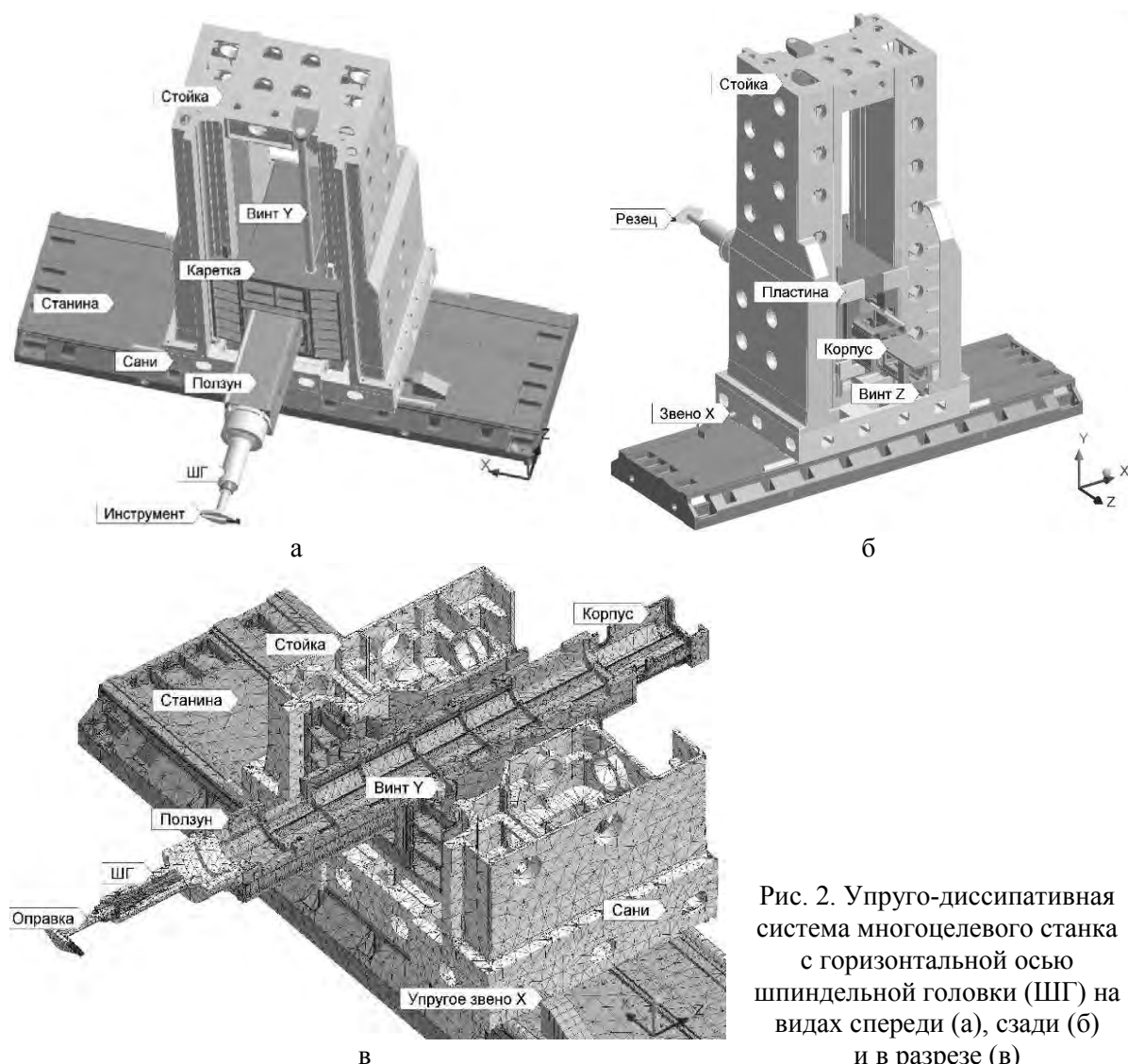


Рис. 2. Упруго-диссипативная система многоцелевого станка с горизонтальной осью шпиндельной головки (ШГ) на видах спереди (а), сзади (б) и в разрезе (в)

Управлять упруго-диссипативными параметрами динамической модели и тем самым влиять на динамическое качество системы можно, изменяя конструктивные особенности механизмов подсистем либо вводя дополнительные внешние воздействия. К конструктивным параметрам относятся материалы и размеры звеньев. Изменение геометрических параметров звеньев определит не только их жесткостные и диссипативные характеристики, но и передаточные функции в механизмах, что приведет к изменению приведенных параметров системы. Внешние воздействия вво-

дятся посредством устройств активной виброзащиты, актюаторов, которые обеспечивают управляемое изменение инерционных, жесткостных и диссипативных характеристики как отдельных элементов, так и системы в целом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лонцих, П.А. Динамическое моделирование сложных механических систем // Вестник ИрГТУ. – 2002. № 12. – С. 128 – 134.
2. Кудинов, В.А. Динамика станков. – М.: Машиностроение, 1969. – 359 с.
3. Лонцих, П.А. Обеспечение качества, анализ динамических параметров и диагностика технического состояния оборудования технологических систем // Вестник ИрГТУ. – 2003. № 3. – С. 30 – 35 с.
4. Аршанский, М.М. Вибродиагностика и управление точностью обработки на металлорежущих станках. – М.: Машиностроение, 1988. – 136 с.
5. Барков, И.А. Введение в виброакустическую диагностику роторных машин и оборудования. Учебн. Пособие, Спб.: изд-во ЦЕНТР СПб МТУ, 2003. – 160 с.
6. Вавилов, А.А., Солодовников, А.И. Экспериментальное определение частотных характеристик. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 252 с.
7. Виброанализатор СД-21. Руководство по эксплуатации КНТЮ.411711.035.РЭ. – Спб.: ООО Ассоциация ВАСТ, 2012 – 113 с.
8. Айзенберг, Я.М. Адаптивные системы сейсмической защиты сооружений. – М.: Наука, 1978. – 248 с. Расчеты и испытания на прочность. Метод расчета колебаний сложных пространственных конструкций в области низших форм колебаний. Методические рекомендации МРН-82. – М.: ВНИИНМАШ, 1982. – 144 с.

УДК 539.3/8

Хмелев А.А., Реут Л.Е., Сидоров В.А.

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ПЛОСКОГО И ЛИНЕЙНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

*Белорусский национальный технический университет*

*Минск, Беларусь*

Тонкостенные трубы как элементы инженерных конструкций в зависимости от своего назначения изготавливаются из различных материалов и работают в условиях как линейного, так и плоского напряженного состояния, что определяется схемой нагружения, а также конструкцией и жесткостью трубы. Если тонкостенная труба рассматривается как пустотелый стержень, она работает, в основном, на растяжение или сжатия и находится в одноосном напряженном состоянии. Если труба служит для транспортировки сжатых жидкостей и газов, она испытывает продольные и окружные деформации и работает в условиях двухосного напряженного состояния. Часто в конструкциях используются гибкие трубопроводы, выполненные из эластичных материалов с текстильным или нитяным каркасом и служащие для подачи под давлением жидкостей или газов (резиновые рукава, шланги и т.д.). Стенки этих сосудов работают только в условиях плоского напряженного состояния.

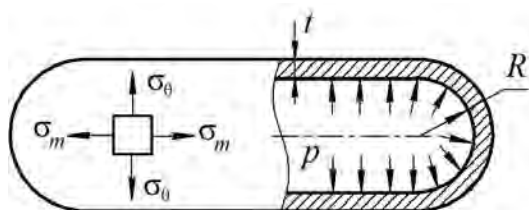


Рис. 1. Расчетная схема трубы как сосуда давления

Рассмотрим условия работы тонкостенного сосуда, представленного на рис. 1, и исследуем напряженное и деформированное состояние его стенок для данной схемы нагружения. Проведем сравнительный анализ полученных результатов для двух вариантов изготовления – для металлической и резиновой трубы.

Данная расчетная схема соответствует условиям работы водопровода, газопровода, парового котла, шины автомобиля и т.д.