

УДК681.5.09

Гулай А.В., Зайцев В.М.

## ИНТЕЛЛЕКТНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ КЕПСТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

*Белорусский национальный технический университет*

*Минск, Беларусь*

*С развитием технологий создания интеллектуальных систем наметилась тенденция их использования для комплексного решения важнейших задач цифровой обработки сигналов, несущих фактографическую информацию о колебательных процессах. С учетом этого проанализированы основные вопросы построения интеллектуальных систем контроля вибраций и шумов при акустической диагностике машин и механизмов. Рассмотрена структурно-функциональная схема многоканальной системы интеллектуального анализа и прогнозирования колебательных процессов в машинах. В схеме предусмотрено использование сенсорных компонентов, работа которых основана на индукционном, электростатическом, тензорезистивном и пьезоэлектрическом эффекте. Сенсорные средства системы контроля совместно с сетевым и вычислительным оборудованием обеспечивают формирование восходящих потоков телеметрической информации. Для организации телеметрических сетей интеллектуальной системы рекомендовано применение протокола HART, который предусматривает подключение оконечных сенсоров и функционально завершенных датчиков к мастер-абонентам сетей. В качестве стандарта станционной сети показано использование протокола сети промышленного назначения PROFIBUS-DP. Для анализа энергетических соотношений колебательного процесса с использованием средств цифровой вычислительной техники предложена схема расчета кепстра, которая базируется на результатах построения временного ряда дискретных замеров амплитуды колебаний. Кепстр рассматривается как обратное преобразование Фурье от натурального логарифма квадрата спектральной плотности случайного процесса. Построенная расчетная схема обеспечивает формирование результата контроля независимо от формы сигнала, его фазы и направлений распространения колебаний изучаемого объекта. Приведен пример реализации цифровой технологии кепстрального анализа параметров виброперемещений корпуса транспортной гусеничной машины.*

*Ключевые слова: интеллектуальная система; сенсорный контроль; цифровая технология; кепстральный анализ; акустическая диагностика.*

### **Введение**

Одним из самостоятельных, интенсивно развивающихся направлений сенсорного (в том числе интеллектуального) контроля является акустическая диагностика машин и механизмов. В перечень важнейших проблем акустической диагностики входят следующие классы задач [1]:

- диагностика состояния технического объекта (машины);
- оценка запаса устойчивости и степени износа;
- классификация состояний исследуемых машин и механизмов;
- разделение источников колебаний (вибраций, шумов);
- определение динамических характеристик механических систем.

В основе акустической диагностики технического состояния машин и механизмов лежит предположение об обратимой функциональной зависимости между параметрами состояния контролируемого объекта и диагностическими признаками. В качестве параметров состояния выбирают величины, характеризующие структуру машины, режим ее работы, а также внешние условия ее функционирования. Диагностические признаки определяются с использованием сенсоров, воспринимающих сложные результирующие сигналы (вибрации, шумы), характеристики которых в общем случае зависят от всех параметров состояния машины. Снижению вероятности ошибочного результата при акустическом контроле состояния машины способствует использование комбинированных диагностических признаков. Это особенно эффективно в том случае, когда акустические сигналы объектов контроля являются случайными процессами, и требуются статистические модели диагностики, выходные сигналы которых также носят случайный характер.

#### *Интеллектуальные средства кепстрального анализа колебательных процессов*

В настоящее время для оценки технического состояния машин и механизмов, которые подвержены влиянию колебательных воздействий, создано значительное количество специализированных приборов и средств программного обеспечения [2, 3]. Однако сложность методов контроля колебаний в машинах, обработки экспериментальных данных, анализа результатов контроля, а также автоматизации указанных процедур требует дальнейшего совершенствования аппаратно-программных систем акустической диагностики. В зависимости от целей технического анализа для одних и тех же наборов экспериментальных данных могут применяться разные технологии и алгоритмы цифровой обработки измеряемых вибрационных сигналов. Это позволяет получать характеристики, относящиеся к различным аспектам исследования колебательных процессов, в том числе выполнять Фурье-анализ гармонического состава сигналов.

Следует отметить, что выполнение традиционного цифрового Фурье-анализа гармонического состава сигналов является достаточно эффективным подходом к исследованию колебательных процессов в машинах и механизмах. Этот метод анализа остается актуальным и вполне востребованным в акустической диагностике машин благодаря своей относительно высокой информативности. Однако в ряде случаев он может рассматриваться только как первичный этап исследования колебаний, при этом расширение его аналитических возможностей производится за счет внедрения дополнительных методов цифровой обработки вибрационных сигналов.

В данном случае речь идет о перспективной интеллектуальной технологии кепстрального анализа, в основе которого лежат специальные методы обработки энергетического спектра колебательных процессов исследуемого объекта [1]. Кепстральный анализ позволяет выделить необходимые сведения о вибрационных сигналах путем создания расчетно-аналитической модели, которая обеспечивает сосредоточение информации в ограниченном количестве результирующих всплесков энергии, разнесенных по оси кепстрального времени. Формирование результата контроля в данном случае не зависит от формы сигнала, его фазы и направлений распространения колебаний в изучаемой машине.

В роторных машинах и механизмах достаточно часто наблюдаются колебательные явления, которые связаны с возникновением регулярно проявляющихся возмущений или дефектов. Причем значительные затруднения вызывает процесс приборного определения тех периодических сигналов, которые соответствуют указанным негативным эффектам. В этом плане характерно функционирование машин и механизмов, конструкции которых содержат в своем составе, например, зубчатые кинематические пары и подшипники качения. Наиболее эффективное выделение указанных сигналов произ-

водится, если соотношение сигнал/шум в процессе измерений составляет не менее 30–35 дБ.

На рис. 1 представлена структурно-функциональная схема построения многоканальной системы интеллектуального анализа и прогнозирования колебательных процессов в машинах и механизмах. Следует отметить, что в общем случае может рассматриваться использование в системе сенсорных компонентов, работа которых основана на самых разных физических эффектах. Сенсорные средства совместно с сетевым и вычислительным оборудованием обеспечивают формирование восходящих потоков телеметрической информации.

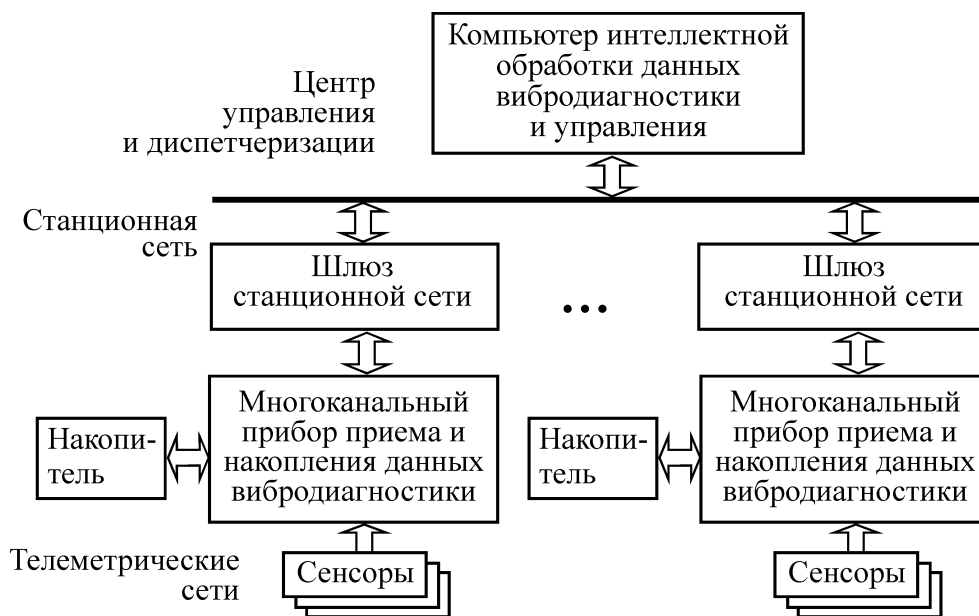


Рис. 1. Структура интеллектуальной системы анализа колебательных процессов

При исследовании конкретных видов колебательных процессов могут использоваться различные типы специализированного сенсорного оборудования. Например, интеллектуальное оборудование может включать [2, 3]:

индукционные и индуктивные сенсоры для преобразования в электрические сигналы колебательных перемещений и скоростей контролируемых объектов на частотах от 10 до 1500 Гц;

электростатические (емкостные) сенсоры для формирования электрических сигналов колебательных перемещений в широкой полосе частот от 15 Гц до 200 кГц;

низкочастотные тензорезистивные сенсоры для измерения виброускорений на частотах до 20 Гц;

высокочастотные пьезоэлектрические сенсоры виброускорений для работы на частотах до 300 кГц.

Локальное накопление результатов измерений и оперативное формирование их массивов осуществляется с помощью промежуточных накопителей. Конструктивно приборы могут выполняться по модульному принципу в виде функционально завершённых устройств и наделяться возможностями выполнения обширного набора операций. К числу таких операций относится высокоточное измерение и съём первичных параметров колебательных процессов, их оцифровка, скоростное преобразование форматов информации и ее упаковка в транзакции, а также последующая надёжная доставка по сетям в компьютер для интеллектуальной обработки данных и управления [4].

При практическом построении сенсорных сетей на основе интеллектуальных компонентов достаточно высокие результаты можно получить при использовании про-

тока HART (Highway Addressable Remote Transducer). Этот протокол предусматривает подключение оконечных сенсоров и функционально завершенных датчиков к многоканальным приборам приема и накопления данных. Протокол допускает применение как проводных, так и беспроводных физических уровней обмена с разделением передающего и приемного каналов по времени.

Проводный вариант реализуется путем передачи данных последовательным кодом по двухпроводной линии токовой петли стандарта 4–20 мА со скоростью 1200 бит/с при дальности связи до 1500 м. Допускается использование восьмипозиционной фазовой манипуляции с частотой несущего сигнала 3200 Гц при скорости 9600 бод. При этом сохраняется совместимость модулей обработки данных с аналоговыми сенсорами. Согласно протоколу HART доступ к каналу организуется мастером – многоканальным прибором приема и накопления данных по принципу «ведущий – ведомый». Топология типа «звезда» используется при подключении к мастеру до 15 сенсоров с аналоговыми выходами. При организации взаимодействия приборов исключительно с цифровыми выходами предусмотрено применение шинной топологии с 15 ведомыми абонентами и двумя мастерами.

Беспроводный вариант реализуется с использованием радиоканалов на частотах 2400–2483 МГц в соответствии с беспроводным промышленным протоколом Wireless HART. При этом возможно развертывание синхронизированной по времени самоорганизующейся и самовосстанавливающейся сети с ячеистой архитектурой, узлы которой могут наделяться функциями ретрансляторов.

В качестве центральной сети эффективно использование стандарта промышленного назначения PROFIBUS–DP (или PA — для работы в пожароопасных и взрывоопасных условиях). Среда передачи данных — витая пара или оптоволокно. Скорость передачи информации составляет 9600 бит/с. Дальность связи без повторителей электрического сигнала составляет до 1500 м. С помощью средств программного обеспечения многоканальных приборов приема и накопления данных и компьютера обработки и управления результаты прямых измерений параметров могут быть использованы в процедурах расчета значений требуемых виртуальных величин. При этом создаются условия для объединения фактографических и виртуальных параметров в единой базе данных, и может быть организовано комплексное решение требуемых задач исследования.

Компоненты программного обеспечения реализуют алгоритмы цифровой обработки сигналов, а также методы и приемы реализации четкого и мягкого (нечеткого) логико-программного управления на основе наборов экспертных знаний. Это позволяет вырабатывать адекватные (а в ряде случаев — наилучшие) выводы и решения в условиях различных неопределенностей. С развитием методологических и алгоритмических основ, экспертных приемов практического создания и внедрения интеллектуальных систем повышается эффективность их использования для комплексного решения важнейших задач цифровой обработки сигналов, несущих фактографическую информацию о реальных колебательных процессах [5].

Следует отметить, что для систем рассматриваемой категории поиск точных, а тем более оптимальных решений в большинстве случаев не имеет смысла, так как эти решения обладают крайне непродолжительным временем жизни (так называемой «хрупкостью» результирующих значений) и быстро разрушаются даже при незначительных изменениях условий их формирования. Гораздо важнее выработать адекватные осредненные решения, позволяющие обеспечивать рациональные и безопасные режимы функционирования машин и механизмов в заданных диапазонах изменения возмущающих воздействий.

### **Математическая модель кепстрального анализа вибрационных сигналов**

Кепстр (кепструм) — это обратное преобразование Фурье от натурального логарифма квадрата спектральной плотности случайного процесса, которое отображается в виде функции  $C(q)$  от так называемого кепстрального времени  $q$ :

$$C(q) = (2\pi)^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} \ln|X(j\omega)|^2 \exp(j\omega q) d\omega \quad (1)$$

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(t) \exp(-j\omega t) dt \quad (2)$$

В данном случае  $X(t)$  — исходный колебательный процесс, в принципе допускающий полигармоническую аппроксимацию с помощью аддитивных комбинаций наборов синусоидальных функций:

$$X(t) = X_1(t) + X_2(t) + X_3(t) + \dots X_n(t) + \dots, \quad (3)$$

где  $X_n(t) = A_n \sin(2\pi f_n t + \varphi_n)$  — виброперемещения, представленные в виде гармонических составляющих с амплитудами  $A_n$ , частотами  $f_{n-i}$  и фазами  $\varphi_{n-i}$ . Реальные процессы вибрации в ряде случаев выраженной периодичностью и стационарностью фактически могут не обладать. Здесь  $X(j\omega)$  — комплексная функция прямого преобразования Фурье.

Параметр  $q$  имеет размерность времени, в кепстральном анализе он условно называется сачтотой, а его применение обеспечивает разнесение результирующих энергетических всплесков по оси кепстрального времени. Как правило, энергетические всплески в реальных вибрационных процессах размещаются вдоль оси сачтот  $q$  с удалением от нулевой отметки, в то время как всплески помеховых процессов располагаются в непосредственной близости к нулю.

Для контроля машин и механизмов может быть подготовлена библиотека кепстральных образов, соответствующих различным дефектам. Анализ экспериментально полученных кепстральных образов позволяет построить процедуры идентификации и распознавания реальных неисправностей в ходе эксплуатации техники или, по крайней мере, произвести обоснованную предварительную селекцию дефектов. В связи с этим представляет интерес получение выражений для практического использования библиотек кепстральных образов.

Рассмотрим прямое преобразование Фурье

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(t) \exp(-j\omega t) dt \quad (4)$$

Если сигнал определен на интервале времени  $(0, T_n)$ , то, принимая предположение о равенстве сигнала нулю вне этого интервала, получаем:

$$X(j\omega) = \int_0^{T_H} X(t) \exp(-j\omega t) dt = \text{Re } X(j\omega) + j \text{Im } X(j\omega) \quad (5)$$

$$\text{Re } X(j\omega) = A(\omega) = \int_0^{T_H} X(t) \cos(\omega t) dt \quad (6)$$

$$\text{Im } X(j\omega) = B(\omega) = \int_0^{T_H} X(t) \sin(\omega t) dt \quad (7)$$

Функция  $|X(j\omega)|$  характеризует непрерывный амплитудный спектр в общем случае непериодического сигнала  $X(t)$ , заданного на конечном интервале времени, и является огибающей линейчатого спектра. Составные части  $A(\omega)$  и  $B(\omega)$  при  $\omega = 2\pi n f_1$  непосредственно связаны с коэффициентами ряда Фурье:

$$A(\omega) = (T_H/2) [2T_H^{-1} \int_0^{T_H} X(t) \cos(2\pi n f_1 t) dt] = (T/2) a_n \quad (8)$$

$$B(\omega) = (T_H/2) [2T_H^{-1} \int_0^{T_H} X(t) \sin(2\pi n f_1 t) dt] = (T/2) b_n \quad (9)$$

Таким образом, справедливо следующее соотношение:

$$|X(j\omega)|^2 = [A(\omega)]^2 + [B(\omega)]^2 = T_H^2 [a_n^2(n\omega_1) + b_n^2(n\omega_1)]/4 = T_H^2 [A_n^2(n\omega_1)]/4 \quad (10)$$

Это позволяет построить выражение для оценки кепструмов  $C(q)$ . Так как энергия отдельных гармоник в линейчатом спектре пропорциональна квадратам их амплитуд, то, при  $\Delta f = f_1$ , и  $d\omega = 2\pi df \approx 2\pi \Delta f = 2\pi f_1$ , с помощью численного интегрирования по технологии правосторонних прямоугольников выражение (1) может быть преобразовано следующим образом:

$$\begin{aligned} C(q) &\approx (2\pi)^{-1} \sum_{n=0}^{\infty} \{\ln |X(jn\omega_1)|^2\} \exp(jn\omega_1 q) \Delta\omega \approx \\ &\approx T_H^{-1} \sum_{n=0}^{LF-1} \{\ln [T_H^2 [A_n^2(n\omega_1)]/4]\} \exp(j2\pi nq/T_H), \end{aligned} \quad (11)$$

где  $A_n(n\omega_1)$  — компоненты амплитудно-частотного линейчатого спектра. Значение

кепструма определяется как неотрицательная функция кепстрального времени  $q$  в виде квадрата модуля  $C(q)$ :

$$|C(q)|^2 = A^2(q) + B^2(q) \quad (12)$$

$$A^2(q) = T_H^{-1} \sum_{n=0}^{LF-1} \{\ln[T_H^2 [A_n^2(n\omega_1)]/4]\} \cos(2\pi nq/T_H) \quad (13)$$

$$B^2(q) = T_H^{-1} \sum_{n=0}^{LF-1} \{\ln[T_H^2 [A_n^2(n\omega_1)]/4]\} \sin(2\pi nq/T_H) \quad (14)$$

При заданном разрешении  $R$ , которое имеет размерность Гц/линию, верхней  $f_B$  и нижней  $f_H$  граничных частотах спектра сигнала количество линий  $LF$  спектра (вложенных полос частоты) определяется соотношением:

$$LF = \text{Ant}\{(f_B - f_H)R^{-1} + 1\} \quad (15)$$

где  $\text{Ant}$  — функция Антье. Для сигнала с равномерным сплошным спектром совокупность значений кепстра в окрестности точки кепстрального времени  $q = 0$  по форме близка к дельта-функции. Если в разложении сигнала имеются значительные неоднородности в области некоторых частот  $f_k$ , то в окрестности значений  $q_k = 1/f_k$  будут наблюдаться всплески кепстра.

В качестве примера кепстрального анализа колебательных процессов использованы результаты экспериментальных измерений виброперемещений корпуса гусеничной машины, которая предназначена для транспортирования радиоэлектронного оборудования. Вибрационные процессы регистрировались во время стоянки транспортной машины при отключенном маршевом двигателе и являлись следствием работы навесного мотор-генератора для автономного электроснабжения аппаратуры. Для колебательных процессов характерны следующие исходные значения частотных параметров:  $f_H = 10$  Гц;  $f_B = 1000$  Гц.

На рис. 2, а приведен фрагмент, содержащий 32 отсчета периодограммы исходного сигнала виброперемещений, который отражает общий характер развития вибрационного процесса во времени. Шаг дискретизации процесса выбран равным  $10^{-4}$  с; величина сигнала показана в относительных единицах. Результаты расчета масштабированных кепстральных значений вибрационных сигналов  $|C(q)|^2$  представлены на рис. 2, б.

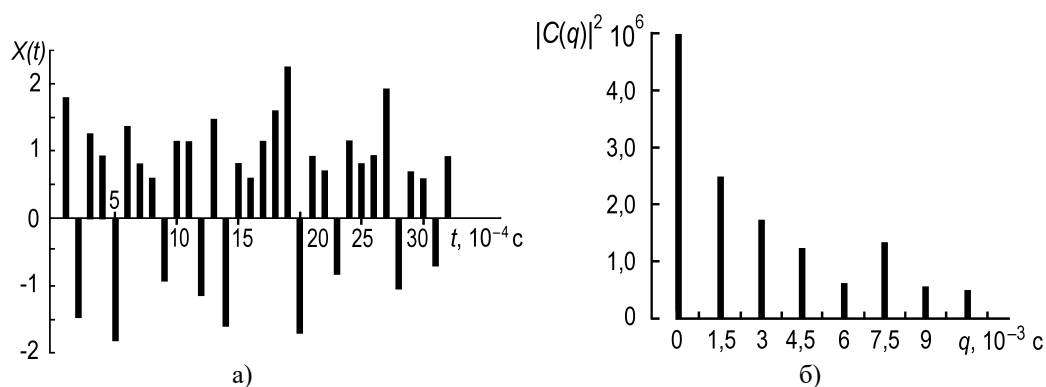


Рис. 2. Фрагмент периодограммы (а) и кепстральная характеристика (б) вибрационного сигнала

Энергетические всплески наблюдаются для вибрационных сигналов, в составе которых имеются наложенные друг на друга колебательные процессы, порожденные импульсными (ударными) нагрузками. Из-за наложения колебаний разных частот отдельные составляющие в частотном спектре неразличимы, хотя каждый источник воздействия порождает свой индивидуальный ряд гармонических колебаний. Для каждого такого ряда колебаний наблюдается энергетический всплеск на оси кепстрального времени, величина которого определяется амплитудами всех гармоник этого ряда.

В рассматриваемом примере расположение отдельных пиков на оси частот имеет характер, близкий к аperiodическому:  $\sim 666, 333, 222, 166, 133, 111, 95, \dots$  Гц. По мере увеличения  $q$  (при уменьшении кепстральной частоты) наблюдается плавное снижение значений  $|C(q)|^2$ . Однако на частоте  $\sim 133$  Гц происходит нарушение этой тенденции — имеется значительный рост величины кепструма. Это указывает на наличие в составе вибрации достаточно выделяющегося в энергетическом отношении колебательного процесса с основной частотой  $\sim 133$  Гц.

Кепстральный анализ позволяет обнаруживать ударные импульсы в составе вибрации, причинами возникновения которых могут быть, например, возвратно-поступательные перемещения каретки, биения вала вследствие разрушения шариков подшипника и другие. Однако использование данного метода позволяет выполнять лишь качественную оценку вибрационных колебаний. Результаты кепстрального анализа колебаний могут учитываться в процессе проектирования оборудования, которое подвергается вибрации при его транспортировании. Кроме того, изучение кепстра вибрации необходимо при создании систем ее гашения с целью повышения надежности и долговечности машин и механизмов.

### Заключение

В роторных машинах и механизмах наблюдаются колебательные явления, которые связаны с возникновением регулярно проявляющихся возмущений или дефектов. Для анализа энергетических соотношений колебательного процесса с использованием средств цифровой вычислительной техники предложена схема расчета кепстра, которая базируется на результатах построения временного ряда дискретных замеров амплитуды колебаний. Кепстр рассматривается как обратное преобразование Фурье от натурального логарифма квадрата спектральной плотности случайного процесса. Расчетно-аналитической модель обеспечивает определение ограниченного количества результирующих всплесков энергии, разнесенных по оси кепстрального времени. Рассмотрен пример использования цифровой технологии кепстрального анализа параметров виброперемещений корпуса транспортной гусеничной машины.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Артоболевский, И. И. Введение в акустическую динамику машин / И. И. Артоболевский, Ю. И. Бобровницкий, М. Д. Генкин. — М.: Наука, 1979. — 295 с.
2. Петрухин, В. В. Основы вибродиагностики и средства изучения вибрации / В. В. Петрухин, С. В. Петрухин. — М.: Инфра, Инженерия – Петербург, 2010. — 176 с.
3. Приборы и системы для изучения вибрации, шума и удара. Книга 1 / Под ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 1978. — 439 с.
4. Гулай, А. В. Архитектура интеллектуальных систем / А. В. Гулай, В. М. Зайцев. — Минск: ИВЦ Минфина, 2018. — 367 с. — (Библиотека инженера по интеллектуальным системам).
5. Тропченко, А. Ю. Цифровая обработка сигналов. Методы предварительной обработки / А. Ю. Тропченко, А. А. Тропченко. — СПб.: ГУИТМО, 2009. — 100 с.

УДК 629.113.073

Гурвич Ю.А.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ УГЛОВОГО УСКОРЕНИЯ ВЫХОДНОГО ВАЛА КАРДАННЫХ ПЕРЕДАЧ В ФУНКЦИИ ДВУХ УГЛОВ

*УО «Белорусская государственная академия авиации»*

*Минск, Беларусь*

*В данной статье выполнено исследование углового ускорения одно- и двух шарнирной карданной передачи в функции двух углов при переменном угле излома. С угловым ускорением связано возникновение дополнительного крутящего момента на колесах машин в виде периодической и почти гармонической функции. Установлено, по всей видимости, впервые, что этот дополнительный крутящий момент придает вращающемуся колесу ещё и осциллирующее движение относительно его оси вращения. Это негативно отразится на работе многих деталей транспортного средства.*

Из теоретической механики [1–2] известно, что основными показателями вращения любого тела, в том числе выходного вала карданной передачи являются его кинематические характеристики: угол поворота, угловая скорость и угловое ускорение. Как известно из литературы [3–7] основным критерием неравномерности вращения любого тела является его угловая скорость, которая оказывает негативное влияние на выходные характеристики трансмиссии и механизмы машин.

При подготовке технических специалистов, занимающихся разработкой и эксплуатацией автомобильной техники, недостаточное внимание в технической литературе и в учебном процессе технических вузов уделяется изучению вопроса, связанного с угловым ускорением выходного вала одно- и двухшарнирной карданной передачи в функции двух углов [1–7].

В данной работе с помощью математического пакета Mathcad выполнено исследование кинематических характеристик одно- и двухшарнирной карданной передачи с переменным углом излома. Основное внимание посвящено изучению углового ускорения, с которым связано возникновение дополнительного крутящего момента на колесах машин. Установлено, по всей видимости, впервые, что этот дополнительный крутящий момент придает вращающемуся колесу ещё и осциллирующее движение относительно его оси вращения. Это негативно отразится на работе многих деталей транспортного средства.