

УДК 62

С.П. Глушков, С.С. Глушков, В.И. Сигимов

Вейвлет-функции Морлета в исследовании переменных составляющих крутящего момента двигателей внутреннего сгорания

В статье приведены исследования по определению переменных составляющих крутящего момента валовых линий двигателей внутреннего сгорания при их эксплуатации. Наиболее опасными в динамическом отношении при работе ДВС на неустановившихся режимах являются резонансные явления, возникающие в линии передачи крутящего момента. Особенно велика вероятность появления этих резонансов у транспортных машинных агрегатов и установок с ДВС, в которых изменяется не только возмущающее воздействие, но и производится структурное изменение крутильных колебаний. Например, при переключении передачи транспортной машины происходит рассогласование соотношений угловых скоростей и крутящих моментов со стороны привода и отбора энергии, с последующим выравниванием средних значений угловых скоростей ведущей и ведомой частей системы. В процессе эксплуатации ДВС необходимо знать величину действительного крутящего момента, для его определения использовалось вейвлет-преобразование сигналов на основе материнской функции Морлета. Для динамического анализа необходимо иметь конкретные данные технических параметров всех его элементов: моментов инерции сосредоточенных масс (кривошипно-шатунного механизма ДВС, маховика, реверс-редуктора, промежуточных валов); поступательно движущихся масс кривошипно-шатунного механизма, перемещающихся в направляющих (втулки цилиндров, жестко связанных с корпусом (остовом)); разобщительной муфты; передаточного отношения реверс-редуктора для каждой ступени. Эти данные позволяют определять вероятность возникновения опасных резонансных зон во всем эксплуатационном скоростном диапазоне использования ДВС. Получена устойчивая локализация сигналов угловых перемещений в валовой линии. Локализация сигналов осуществлялась в режиме реального времени, отражала процесс изменения переменной составляющей крутящего момента. С использованием функции Морлета определен структурный коэффициент, позволяющий установить связь между параметрами сигнала и параметрами изменения крутящего момента. Измерение угловых деформаций, вызванных колебаниями крутящего момента, производилось датчиками крутильных колебаний, установленными на валовой линии теплохода проекта № 559Б «Капитан Эсаулов».

Ключевые слова: *крутящий момент, двигатель внутреннего сгорания, динамические характеристики, вейвлет-преобразование, амплитуда колебаний.*

Двигатели внутреннего сгорания в составе энергетических установок работают на неустановившихся режимах в условиях переменных нагрузок, а в линии передачи энергии от источника (ДВС) до потребителя возникают силы сопротивления. Так как все составляющие звенья валовой линии обладают упругими свойствами, при изменении крутящего момента двигателя $M_{кр}(t)$ и моментов сопротивления $M_c(t)$ возникают строго гармонические крутильные колебания. Кроме того, при любых изменениях нагрузки, даже при стационарной нагрузке (например, в условиях стенда), на крутильную систему валовой линии действуют регулярные по углу поворота коленчатого вала возмущающие воздействия, вызванные самим принципом циклического преобразования энергии в ДВС.

Наиболее опасными в динамическом отношении при работе ДВС на неустановившихся режимах являются резонансные явления, возникающие в линии передачи крутящего момента. Особенно велика вероятность появления этих резонансов у транспортных машинных агрегатов и установок с ДВС, в которых

не только изменяется возмущающее воздействие, но и производится структурное изменение крутильных колебаний. Например, при переключении передачи транспортной машины происходит рассогласование соотношений угловых скоростей и крутящих моментов со стороны привода и отбора энергии, с последующим выравниванием средних значений угловых скоростей ведущей и ведомой частей системы.

В процессе согласования скоростей возникают дополнительные нагрузки на промежуточные детали энергетической установки, что приводит к изменению их напряженно-деформированного состояния, а следовательно к увеличению их податливости, а также к пробуксовыванию фрикционных элементов соединительных муфт. При этом происходит значительное изменение средней угловой скорости вращения коленчатого вала ДВС в период эксплуатации при наработке. Диапазон изменения угловой скорости охватывает одну или несколько резонансных зон, поэтому при оценке динамической нагруженности элементов энергетической установки и ее функциональных характеристик учет резонансных яв-

лений может оказаться определяющим. Кроме того, сами элементы в этой сложной механической системе в целом обладают различными динамическими свойствами, и изменение поведения одного звена в системе меняет качественную картину динамических явлений в энергетических установках [1, 2]. Для динамического анализа необходимо иметь конкретные данные технических параметров всех его элементов: моментов инерции сосредоточенных масс (кривошипно-шатунного механизма ДВС, маховика, реверс-редуктора, промежуточных валов); поступательно движущихся масс КШМ, перемещающихся в направляющих (втулки цилиндров, связанных жестко с корпусом (остовом)); разобщительной муфты; передаточного отношения реверс-редуктора для каждой ступени. Эти данные позволяют определять вероятность возникновения опасных резонансных зон во всем эксплуатационном скоростном диапазоне использования ДВС.

Динамические показатели ДВС можно рассматривать с двух точек зрения: с позиции процессов, происходящих внутри двигателя (показателей внутренней динамики), и с позиции взаимодействия ДВС с потребителем энергии (показателей внешней динамики). Рассматриваемая система состоит из двух частей валовой линии энергетической установки, вращающихся с угловой скоростью определенных масс, входящих в эти части и связанных между собой промежуточными валами. Крутящий момент M_d двигателя внутреннего сгорания и реверс-редуктора, равно как и момент сопротивления M_c со стороны промежуточного вала потребителя, содержат, кроме постоянных составляющих M_d^{cp} и M_c^{cp} , еще и главные гармонические составляющие i -го порядка. При условии, что система линейна, амплитуды гармонических составляющих крутящих моментов M_d^{cp} и M_c^{cp} будут различаться как по величине, так и по фазе, но с обязательным равенством круговой частоты ω .

Для определения изменения крутящего момента по длине валовой линии энергетической установки необходимо исследовать амплитудные значения A_0 крутящих моментов произвольно заданной функции координаты x по длине: $M(x, t) = A_0(x) \sin \omega t$.

Исследования можно провести с помощью датчиков крутильных колебаний, установленных на неподвижном основании [3] и определяющих угловые деформации, вызванные колебаниями крутящего момента в валовой линии машины [4]. Для осуществления диагностирования на валу устанавливаются два импульсных датчика углового положения вала, фиксирующих его крутильные колебания [5]. В процессе вращения ненагруженного вала производят синхронизацию сигналов от этих датчиков по фазе измеряемых крутильных колебаний. При работе нагруженного вала фиксируют сдвиги импульсов сигналов крутильных колебаний в двух сечениях вала, расположенных на расстоянии друг от друга, и по разности значений этих сдвигов определяют угловые деформации, вызванные колебаниями крутящего момента в линии привода машины. Для уточнения измерений моментных нагрузок холостого хода вначале измеряют сдвиг импульсов, регистрируемый двумя датчиками при вращении вала в одном и другом направлениях. После этого к величине измеряемого сдвига импульсов при работе вала под нагрузкой прибавляют половину измеренного ранее сдвига. Технический результат заключается в повышении точности и достоверности определения моментных нагрузок на вращающихся валах.

К причинам, препятствующим достижению технического результата, относится то, что на неподвижном основании устанавливают только датчики крутильных колебаний, определяющие лишь угловые деформации, вызванные колебаниями крутящего момента в валовой линии машины, что не позволяет полно определить напряженно-деформированное состояние деталей машин. Следовательно, получить достоверные диагностические параметры не представляется возможным. Также отсутствует возможность совершенствования проектирования и изготовления машин.

Улучшения качества диагностики можно добиться тем, что датчики, включающие сенсоры, элементы питания, устройство для преобразования, передачи и хранения информации, жестко закрепляют на валу, и/или на составном валу, и/или на различных валах машины [6], при этом устройство содержит два и более датчиков, расположенных в двух и бо-

лее сечениях, а к одному преобразователю, и/или элементу питания, и/или блоку хранения информации, и/или блоку передачи информации подключают один сенсор и более. Таким образом, крепление на валу датчиков, преобразователей и блоков позволяет сократить измерительный тракт от сенсоров, а крепление на валу нескольких датчиков позволяет более точно и полно определить динамические характеристики машин и напряжения в валах. Измерения динамических характеристик «время – время», и/или «перемещение – время», и/или «скорость – время», и/или «ускорение – время» проводят на вращающихся валах. Например, если на валу установлено два датчика, то от датчика 1 измеренный сигнал передается любым известным способом в форме электрического, и/или цифрового, и/или иного обработанного сигнала. Измерения динамических характеристик датчиком 1 проводят при вращении вала на холостом ходу и под нагрузкой, а также в статичном положении вала. Полученный в определенное время сигнала $A_1(t)$ с датчика 1, закрепленного в определенной точке на валу по каждой из осей x , y и z , в виде динамических характеристик $A_1(t_x)$, $A_1(t_y)$, $A_1(t_z)$ в функции «время – время», и/или «скорость – время», и/или «ускорение – время» вычитают из соответствующего синхронного по фазе полученного сигнала с динамическими характеристиками $A_2(t_x)$, $A_2(t_y)$, $A_2(t_z)$ датчика 2, закрепленного в другой определенной точке вала. После вычитания остаются динамические характеристики $A_{рез}(t_x)$, $A_{рез}(t_y)$, $A_{рез}(t_z)$ в функции «время – время», и/или «скорость – время», и/или «ускорение – время», пропорциональные соответствующей деформации участка: изгибу в вертикальной и/или горизонтальной плоскости, кручению, осевому смещению. Для исключения влияния колебаний, передающихся от опор к валам, из разности сигналов, пропорциональных деформациям участков, вычитаются колебания по соответствующим осям $A_3(t_x)$, $A_3(t_y)$, $A_3(t_z)$ датчика, закрепленного на опоре. В результате вычитания получают функции $A_0(t_{x0})$, $A_0(t_{y0})$, $A_0(t_{z0})$. Вычитаться могут динамические характеристики как в детерминированном варианте, так и в функции времени с заданной частотой по формулам вида

$$\begin{aligned} A_{рез}(t_x) &= A_1(t_x) - A_2(t_x); \\ A_{рез}(t_y) &= A_1(t_y) - A_2(t_y); \\ A_{рез}(t_z) &= A_1(t_z) - A_2(t_z); \\ A_0(t_{x0}) &= A_1(t_x) - A_2(t_x) - A_3(t_x); \\ A_0(t_{y0}) &= A_1(t_y) - A_2(t_y) - A_3(t_y); \\ A_0(t_{z0}) &= A_1(t_z) - A_2(t_z) - A_3(t_z). \end{aligned}$$

В дальнейшем применяют математические методы обработки сигналов динамических характеристик. Трехмерные образы (частота – время – амплитуда), которые получаются в результате анализа Фурье, сложны для формального распознавания. Поэтому необходимо применять другие методы для анализа сигнала, например кратномасштабные.

Кратномасштабные методы, в частности вейвлет-преобразование, получили большое распространение среди исследователей применительно к обработке сигналов в течение последних десятилетий [7]. Отличительной особенностью вейвлет-анализа является его высокая чувствительность к кратковременным высокочастотным флуктуациям сигнала, так как вейвлет-окно обеспечивает адекватную оценку таких флуктуаций за счет одновременного увеличения амплитуды окна при уменьшении его ширины. Разрешающая способность анализа во временной области возрастает с ростом частоты. Наиболее важную информацию о сигнале несет положение и значение локальных максимумов модуля вейвлет-преобразования. В математике локальная регулярность функции $f(t)$ часто измеряется показателем Гельдера [8], характеризующим гладкость функции. Показатель Гельдера во времени имеет вид

$$|W_f(a, t)| \leq Aa^\alpha.$$

Для вычисления показателя Гельдера берется $\log$ каждой части уравнения и строится график вейвлет-коэффициентов:

$$\log |W_f(a, t)| = \log A + \alpha \log a.$$

Формула показывает, что соотношение между $\log |W_f(a, t)|$ и масштабной переменной a определяется показателем Гельдера. Наклон линии, которая аппроксимирует логарифмический график, является показателем Гельдера α в момент времени t для линии максимумов модуля вейвлет-преобразования:

$$\alpha = \frac{\log |W_f(a, t)|}{\log a}.$$

Выбор образующей вейвлет-функции для вычисления показателя Гельдера зависит от характера поставленной задачи и от анализируемого сигнала. В данном исследовании необходимо подобрать образующую вейвлет-функцию, имеющую не менее двух нулевых моментов, хорошо локализованную как в частотной, так и во временной областях [9]. Для исследования сигнала с датчиков, установленных на вращающихся валах [10], наиболее удачным вариантом является симметричный базис. Это позволяет исследовать сигналы, которые аппроксимируются полиномами больших порядков.

Симметричный вейвлет Морлета полностью соответствует данным условиям (рис. 1). Функция Морлета имеет аналитический вид

$F(x) = e^{-x^2/2} \cos 5x$ в N точках регулярной сетки для интервала $[-4; 4]$.

Измерение угловых деформаций, вызванных колебаниями крутящего момента, производилось датчиками крутильных колебаний, установленными на валовой линии теплохода проекта № 559Б «Капитан Эсаулов».

Испытания проводились при различной скорости вращения вала двигателя (330–900 об/мин). Запись сигналов производилась на протяжении нескольких секунд после непродолжительной работы двигателя при данном числе оборотов, которое синхронно устанавливалось автоматически датчиком ТНК-1 или по тахометру.

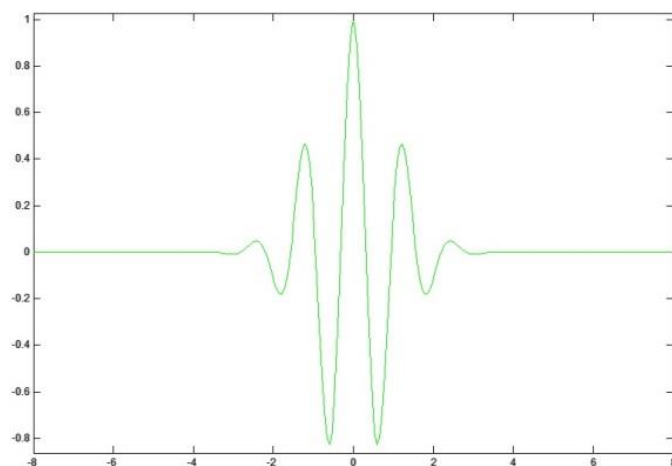


Рис. 1. График вейвлет-функции Морлета

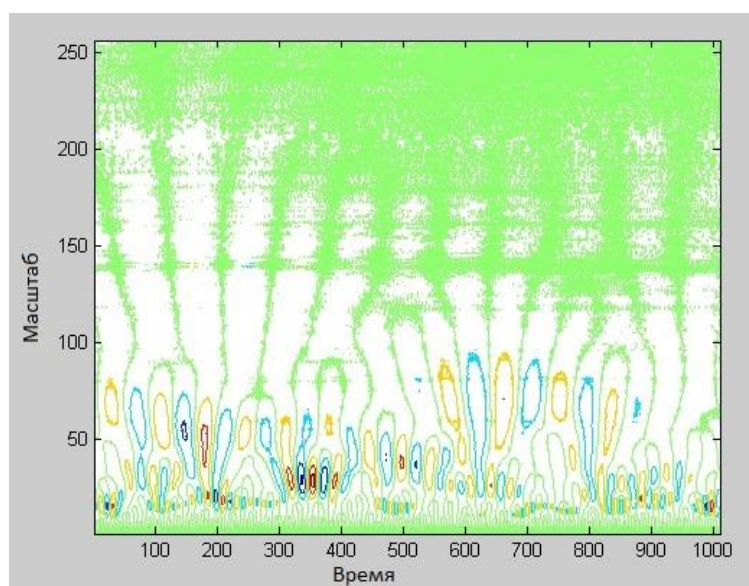


Рис. 2. Скалограммы абсолютных значений вейвлет-коэффициентов сигнала при скорости вращения вала двигателя 900 об/мин

Для определения несущего диапазона масштабов были рассмотрены скалограммы (рис. 2) абсолютных значений вейвлет-коэффициентов (рис. 3), на основе которых в дальнейшем вычислялись величины показателей Гельдера. Определено, что несущий диапазон масштабов лежит в пределах от 22 до 134.

Наиболее выражены особенности сигнала при скорости вращения вала 900 об/мин.

Амплитудные значения крутящего момента вращения вала двигателя 900 об/мин, вычисленные на основе функции Морлета по показателям Гельдера, представлены на рис. 4 и 5.

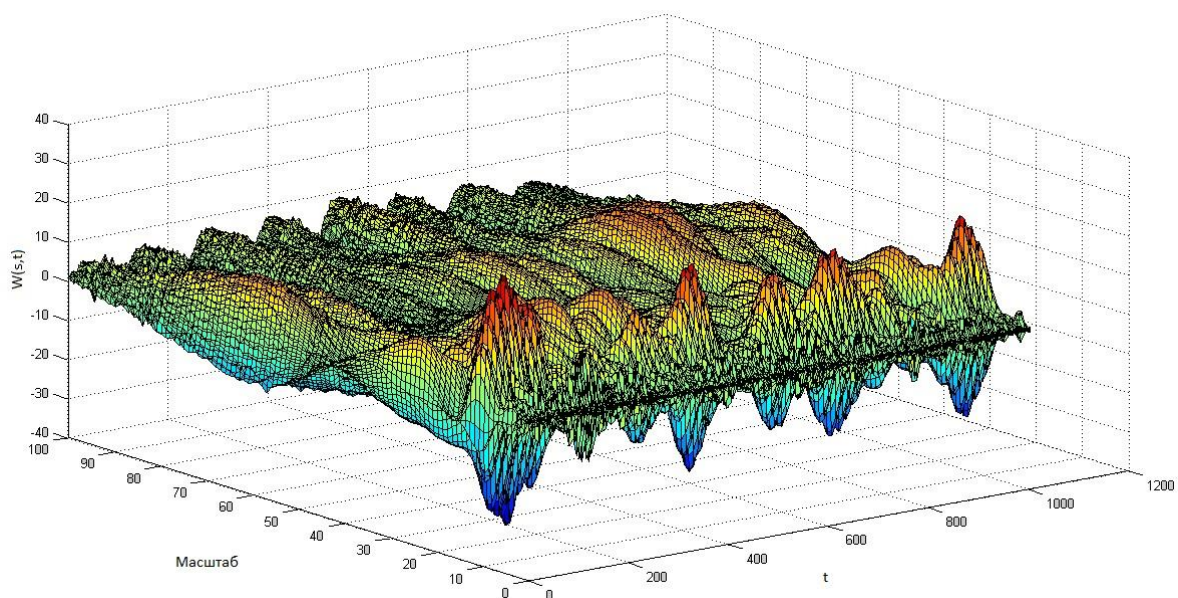


Рис. 3. Вычисление вейвлет-коэффициентов сигнала при скорости вращения вала двигателя 900 об/мин

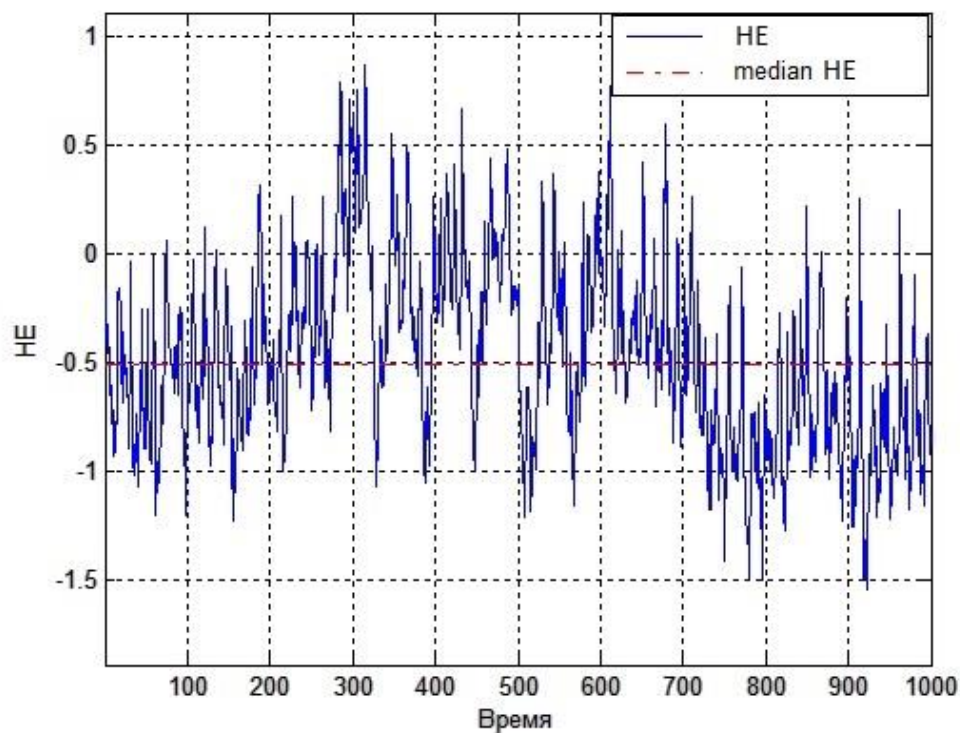


Рис. 4. Вычисленные показатели Гельдера вейвлет-коэффициентов сигнала при скорости вращения вала двигателя 900 об/мин за 1 об

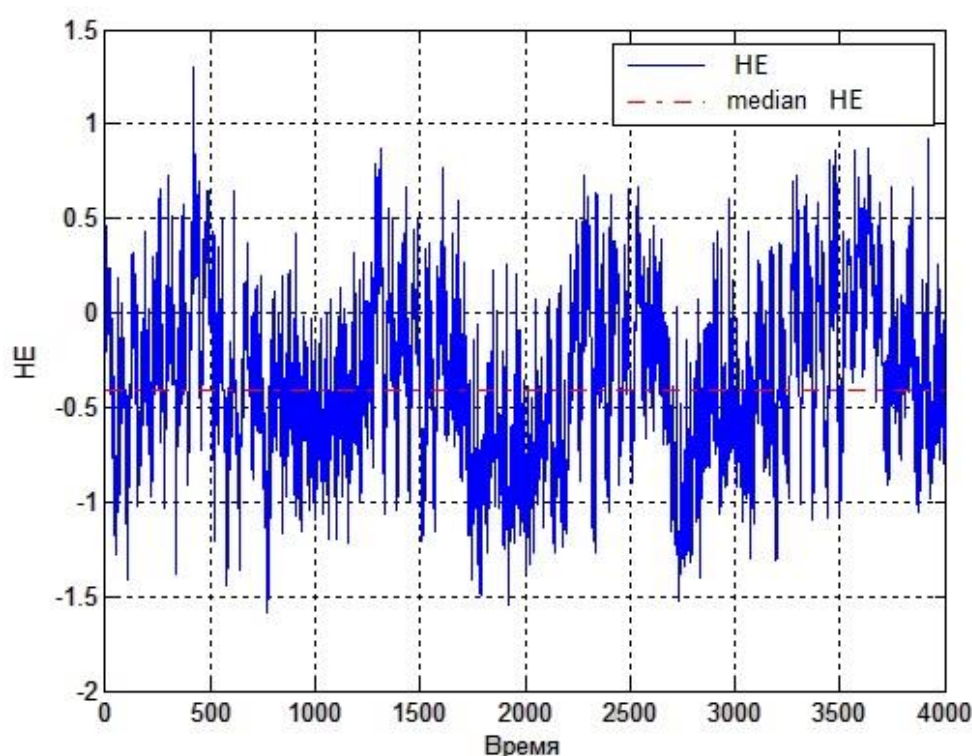


Рис. 5. Вычисленные показатели Гельдера вейвлет-коэффициентов сигнала при скорости вращения вала двигателя 900 об/мин за 4 об

Выводы. Способ определения переменных составляющих крутящего момента ДВС заключается в преобразовании угловых поворотов вала в соответствующие цифровые сигналы, получаемые от чувствительных элементов и приемников сигнала, расположенных на валу, или на составном валу, или на различных валах машины, в одном и более сечении, при этом сигналы синхронизируют по фазе между собой. Измеряют колебания в виде не-

прерывной функции с заданной частотой дискретизации. Из цифровых сигналов с помощью вейвлет-преобразования на основе материнской функции Морлета определяются амплитудные значения крутящего момента. Способ отличается от существующих еще и тем, что измерения динамических характеристик на валу, или на составном валу, или на различных валах машины синхронизируют по фазе с измеренными сигналами, вызванными колебаниями опоры или опор вала/машины.

Библиографический список

1. Глушков С.П., Коновалов В.В. Идентификация изменения технического состояния транспортного подвижного состава // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2014. № 3. С. 139–147.
2. Глушков С.П., Лебедев О.Б. Оценка деградации технического состояния коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания по динамическим характеристикам // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2013. № 2. С. 191–194.
3. Глушков С.С. Платформа для установки и позиционирования навесных деталей на поверхности валов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2014. № 3. С. 147–148.
4. Измерение крутящего момента на вращающихся валах / А.С. Гуринов, В.В. Дудник, В.Л. Гапонов, В.В. Калашников // Инженерный вестник Дона: Электрон. науч. журн. 2012. № 2. С. 78–84. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/798> (обращения: 15.04.2016).
5. Патент 2239803 Российская Федерация, МПК G01L 1/22. Измерение механических колебаний или ультразвуковых, звуковых или инфразвуковых колебаний с использованием средств, чувствительных к излучению, например оптических средств / Дедученко Ф.М., Дылюк А.Г., Коновалов И.Л., Липко А.Н.; Заявитель и патентообладатель ОАО «НПО Промавтоматика»; Заявл. 05.06.2002; Опубл. 10.11.2004.

6. Патент 2567017 Российская Федерация, МПК G01M 13/00. Способ и устройство для диагностирования машин / Глушков С.С.; Заявитель и патентообладатель – он же. № 2013153914; Заявл. 12.03.2013; Опубл. 27.10.2015, Бюл. № 30. 9 с.: ил.

7. Идентификация повреждений подшипников судовых валопроводов / С.С. Глушков, Б.О. Лебедев, В.В. Коновалов, Н.С. Ткаленко // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2013. № 2. С. 200–204.

8. Глушков С.С., Ткаленко Н.С. Показатель Гельдера как индикатор расположения повреждений в конструкции оборудования // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2014. № 1–2. С. 209–213.

9. Глушков С.С., Лебедев О.Б. Граничные условия и вещественный базис исследуемого сигнала динамического отклика судового оборудования и систем // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2014. № 1–2. С. 231–234.

10. Mallat S.G., Zhong S. Characterization of signals from multiscale edges // 1992 IEEE Transactions on Pattern Recognition and Machine Intelligence. 1992. Vol. 14. P. 710–732.

S.P. Glushkov, S.S. Glushkov, V.I. Sigimov

Morlet Wavelet Functions in the Study of Variable Torque Components of Internal-Combustion Engines

Abstract. In the present paper, we report on a study that was performed to determine the variable shafting-line torque components of internal-combustion engines (ICEs) in operation. In dynamic respect, the most dangerous factors under unsteady operating conditions of ICE are resonant phenomena that occur in torque transmission line. The probability of emergence of such resonances is especially high for transport machine units and ICE plants in which not only the disturbing action undergoes changes but also structural variations of torsional fluctuations occur. For instance, on switching a gear drive of motor vehicle, a mismatch between the ratios of angular velocities and torques on the drive and power-delivery sides occurs with subsequent equalization of the average values of angular velocities in the driving and driven parts of the system. For ICE in operation, one has to know the actual torque value; for determining this quantity, the wavelet transformation of signals based on the parent Morlet function was used. For dynamic analysis, quantitative data on technical characteristics of all ICE components are required. Those characteristics include the inertia moments of localized masses (crank gear, flywheel, reverse gear, intermediate shafts); the inertia moments of progressively moving rail-guided crank-gear masses (cylinder sleeves rigidly connected with the frame, decoupler); and the reverse gear ratio of each step. These data permit evaluation of the emergence probability of dangerous resonant zones throughout the whole operating speed range of ICE. Steady localization of shafting-line angular-displacement signals was performed in real-time mode, the signals reflecting the variation of variable torque component in time. With the use of Morlet function, a structural coefficient establishing the connection between the signal and torque-variation characteristics was evaluated. Angular deformations due to torque variations were measured using torque sensors installed in the shafting line of the Captain Esaulov motorship (project No. 559B).

Key words: *torque; internal-combustion engine; dynamic characteristics; wavelet transformation; oscillation amplitude.*

Глушков Сергей Павлович – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» СГУПС. E-mail: rcpl@ngs.ru

Глушков Сергей Сергеевич – кандидат технических наук, докторант кафедры термодинамики и СЭУ СГУВТа. E-mail: rcpl@ngs.ru

Сигимов Владислав Иванович – кандидат физико-математических наук, завкафедрой физики и химии СГУВТа. E-mail: kphch@nsawt.ru