

DOI: 10.15593/2224-9877/2016.3.08

УДК 681.5.09

В.И. Кочергин, С.П. ГлушковСибирский государственный университет путей сообщения,
Новосибирск, Россия**КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМ
АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ**

В процессе металлообработки неизбежно возникают вынужденные и автоколебания в системе «станок – приспособление – инструмент – деталь». Эти колебания ухудшают качество обрабатываемой поверхности и увеличивают износ инструмента. Особенно актуальной обозначенная проблема является для станков с ЧПУ, где суппорты или столы перемещаются неравномерно при использовании шагового механизма перемещения, а скорость резания может постоянно изменяться при непрерывном характере обработки деталей. В связи с этим требуется обеспечить контроль неравномерности движения и контроль технического состояния систем автоматического управления. В представленной статье предлагается способ решения данной проблемы на примере контроля технического состояния систем автоматического регулирования частоты вращения, который был реализован ранее применительно к системам автоматического регулирования дизельных двигателей внутреннего сгорания.

Совместное движение любого объекта регулирования и регулятора можно представить в виде системы уравнений. Характер переходных процессов при использовании электронных, электромеханических и электрогидравлических систем регулирования можно описать зависимостью амплитудных значений углового ускорения от времени запаздывания управляющего сигнала. Качество переходных процессов предлагается оценивать по величине заброса углового ускорения. Приведенные в статье теоретические положения доказывают влияние технического состояния регулятора частоты вращения на характер временной зависимости углового ускорения при изменении внешней нагрузки или частоты вращения вала привода. Таким образом, амплитудные значения углового ускорения в затухающем колебательном процессе содержат достоверную информацию о техническом состоянии системы автоматического регулирования.

Предложенные принципы контроля параметров систем регулирования могут применяться и к электроприводам металлорежущего оборудования. Для оценки неравномерности вращения и контроля технического состояния систем автоматического регулирования предлагается использовать разработанный в Сибирском государственном университете путей сообщения программно-измерительный комплекс. Данный комплекс позволяет фиксировать параметры переходных процессов в графическом и табличном виде, обеспечивать вывод на экран персонального компьютера величины параметра в конкретной точке графика, а также с высокой точностью оценивать характеристики нестабильности установившейся частоты вращения. Изменение технического состояния систем автоматического регулирования в процессе эксплуатации оценивается по отклонению величины амплитудных значений углового ускорения от эталонных, измеренных при исправном состоянии системы.

Ключевые слова: система регулирования, металлообработка, регулятор частоты вращения, неравномерность вращения, вибрация, амплитуда колебаний, чистота обрабатываемой поверхности, угловая скорость, угловое ускорение, контроль технического состояния, металлообработка, энкодер, сглаживание Гаусса.

V.I. Kochergin, S.P. Glushkov

Siberian State Transport University, Novosibirsk, Russian Federation

CONTROL OF A TECHNICAL CONDITION OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS

In the process of the metal cutting inevitably appear forced and auto-oscillations in the system "machine – fixture – tool – detail". These vibrations worsen quality of the processed surface and increase the wear of instrument. Particularly relevant issue is designated for machine tools with CNC, where slides or tables moved irregularly by using indexing mechanism and the cutting speed can be continuously varied in continuous processing of parts. In this connection, you need to ensure the monitoring of irregular movements and the control of a technical condition of automatic control systems. This article proposes a method of solving this problem on the example of inspection of a technical condition of automatic control systems of rotation frequency, which was implemented earlier with reference to automatic control systems of diesel internal combustion engines.

The joint movement of any object of regulation and the regulator it is possible to present systems of the equations in the form. Nature of transition processes when using electronic, electromechanical and electrohydraulic systems of regulation can be described dependence of amplitude values of angular acceleration on time of delay of the managing director of a signal. Quality of transition processes is offered to be estimated in size of throwing of angular acceleration. The theoretical provisions provided in article prove influence of technical condition of the regulator of frequency of rotation on nature of temporary dependence of angular acceleration at change of external loading or at change of frequency of rotation of a shaft of the drive. Thus, amplitude values of angular acceleration contain reliable information about technical condition of system of automatic control in the fading oscillatory process.

The offered principles of control of parameters of systems of regulation can be applied also to electric drives of the metal-cutting equipment. For an assessment of unevenness of rotation and control of technical condition of systems of automatic control it is offered to use the program and measuring complex developed at the Siberian State Transport University. This complex allows to fix parameters of transition processes in graphic and in a tabular style, to provide a conclusion to the screen of the personal computer parameter size in a concrete point of the schedule, and also with high precision to estimate characteristics of instability of the established rotation frequency. The established rotation frequency. Change of technical condition of systems of automatic control is in use estimated on a deviation of size of amplitude values of angular acceleration from reference, measured at a working order of system.

Keywords: control system, metal, speed controller, rotation uneven, vibration, oscillation amplitude, purity of the treated surface, angular velocity, angular acceleration, technical inspection, metal-working, enkoder, Gauss's smoothing.

Процесс металлообработки неизбежно сопровождается возникновением вынужденных и самовозбуждающихся колебаний в системе «станок – приспособление – инструмент – деталь», обусловленных различными причинами, в том числе неравномерностью вращения приводных механизмов, прерывистым характером процесса резания; дисбалансом вращающихся деталей; неравномерностью припуска; крутильными колебаниями, возникающими вследствие процессов демпфирования материала обрабатываемой детали и деталей станков. Данные колебания приводят к возникновению вибраций, а также снижению чистоты обра-

батываемой поверхности и увеличению износа инструмента [1]. Особенно актуальным является изучение процессов возникновения и затухания колебаний в приводах современного металлообрабатывающего оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ), так как в этом случае движение суппортов или столов осуществляется неравномерно ввиду шагового характера перемещения, а скорость резания может постоянно изменяться при непрерывном характере обработки деталей с различной величиной припуска на обработку [2, 3].

В связи с этим одним из вопросов, требующих внимания при разработке и внедрении технологических процессов металлообработки и, на наш взгляд, недостаточно изученных, становится контроль неравномерности движения и параметров систем автоматического управления. Динамические характеристики являются наиболее значимыми для определения характеристик совместного движения элементов любой системы, состоящей из различных механизмов и управляющих устройств [4]. В статье предлагается способ решения данной проблемы на примере контроля технического состояния систем автоматического регулирования частоты вращения (САРЧ), реализованный ранее на практике применительно к САРЧ дизельных двигателей внутреннего сгорания [5–7].

Типовой переходный процесс и качество регулирования в САРЧ принято оценивать по длительности переходного процесса, величине выброса частоты вращения и неустойчивости установившейся частоты вращения¹ (рис. 1). Синусоидальные колебания частоты вращения, присущие как неустановившимся, так и установившимся режимам работы приводов металлорежущих станков, приводят к изменениям устойчивости процессов резания [8]. Увеличение скоростей резания требует развития методов определения амплитуд автоколебаний станков и, следовательно, методов контроля технического состояния систем управления [3, 9]. Исследования показали, что для оценки технического состояния систем автоматического регулирования ввиду большей информативности диагностического сигнала предпочтительнее использовать вторую производную от скорости изменения регулируемой величины в переходном процессе [6]. Применительно к процессам регулирования частоты вращения такой величиной является угловое ускорение.

¹ ГОСТ Р 55231–2012. Системы автоматического регулирования частоты вращения (САРЧ) судовых, тепловозных и промышленных двигателей внутреннего сгорания. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2013. 15 с.

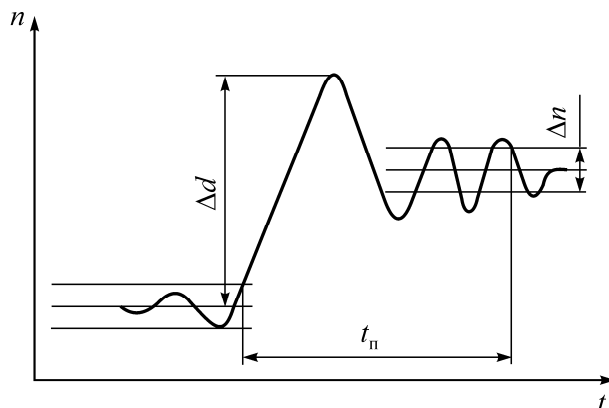


Рис. 1. Характеристики типового переходного процесса: $t_{п}$ – длительность переходного процесса; Δn – нестабильность установившейся частоты вращения; Δd – заброс частоты вращения

Совместное движение любого объекта регулирования и регулятора можно представить в виде системы уравнений, учитывающих изменение во времени относительной величины момента нагрузки, изменение угловой скорости и коэффициент самовыравнивания объекта регулирования; относительное положение органа управления, а также статические и динамические характеристики автоматического регулятора [10]. В зависимости от типа системы автоматического регулирования, определяемого принципами измерения и изменения регулируемого параметра, система уравнений может принимать различный вид.

Для современных систем автоматического регулирования характерно использование электронных, электромеханических и электрогидравлических следящих и регулирующих устройств. В этом случае программное обеспечение управления определяется матрицами соответствия возмущающих и управляющих воздействий, а математическая модель такой САРЧ может быть представлена в виде системы линейных дифференциальных уравнений с обыкновенными производными [11]. Характер переходных процессов при этом описывается зависимостью амплитудных значений углового ускорения от времени запаздывания управляющего сигнала. Время запаздывания служит характеристикой технического состояния САРЧ, так как величина данного параметра зависит от технического состояния и температурного режима исполнительных устройств, от наличия сбоев в программном обеспечении, от напряжения питания и прочих причин.

Качество переходных процессов в системе автоматического регулирования частоты вращения наиболее удобно анализировать после применения символической операторной формы записи дифференциальных уравнений, позволяющей привести систему уравнений к одному нормированному уравнению третьего порядка. Таким образом, после проведения определенных упрощений и интегрирования упрощенного выражения зависимость относительного изменения угловой скорости от времени может быть представлена в следующем виде [6]:

$$\varphi(t) = \delta - Ce^{-\alpha t} \cdot \sin(\beta t \cdot k), \quad (1)$$

где δ – степень неравномерности регулятора; T_D – постоянная времени объекта регулирования; C , α , β , k – коэффициенты, зависящие от параметров состояния регулятора и объекта регулирования и определяемые приведенными ниже выражениями:

$$\alpha = \frac{\delta}{2T_K}, \quad (2)$$

где T_K – характеристика нечувствительности регулятора;

$$\beta = \sqrt{1/T_D T_K - \delta^2/4T_K^2}, \quad (3)$$

$$C = \sqrt{(1/T_D \beta - \alpha \delta / \beta)^2 + \delta^2}, \quad (4)$$

$$k = \arcsin(\delta/C). \quad (5)$$

Аналогичным образом получено выражение для относительного углового ускорения ε , являющегося производной по времени от относительной угловой скорости коленчатого вала:

$$\varepsilon(t) = Ce^{-\alpha t} [\alpha \sin(\beta t - k) + \beta \cos(\beta t - k)]. \quad (6)$$

В выражении (6) коэффициенты C , α , β и k являются функцией от характеристик регулятора T_K и δ . Таким образом, приведенные выражения доказывают влияние технического состояния регулятора частоты вращения на характер временной зависимости углового ускорения, оцениваемой в первую очередь амплитудными значениями полуволн затухающих колебательных процессов углового ускорения, измеренных при изменении внешней нагрузки (скорости резания для металлообрабатывающего оборудования) или же при изменении частоты вра-

щения вала привода. Амплитудные значения ε измеряются в моменты времени t_3 , при которых относительное угловое ускорение принимает экстремальные значения. Эти моменты времени могут быть определены посредством фиксации нулевых значений третьей производной от угловой скорости либо рассчитаны по следующей формуле:

$$t_3 = \frac{1}{\beta} \left(\operatorname{arctg} \frac{2\alpha\beta}{\alpha^2 - \beta^2} + k + \pi n \right), \quad (7)$$

где максимальные значения ε соответствуют $n = 0, 2, 4 \dots$, а минимальные – нечетным значениям n . Полученные теоретические выражения для определения экстремальных значений амплитуд углового ускорения были подтверждены экспериментальными исследованиями.

Безусловно, регулирование параметров металлообработки и частоты вращения коленчатого вала двигателей внутреннего сгорания имеет свои особенности, но известные методики анализа колебательных процессов при вращательном движении валов [12] и предлагаемые принципы контроля параметров систем регулирования по амплитудным значениям углового ускорения и угловой скорости [7] применимы и в данном случае. Результаты контроля переходного процесса в электроприводе с частотным управлением асинхронным двигателем переменного тока приведены на рис. 2 и 3. Из рисунков видны отличия от приведенного на рис. 1 типового характера переходного процесса в САРЧ при изменении частоты вращения, но, тем не менее, очевидно

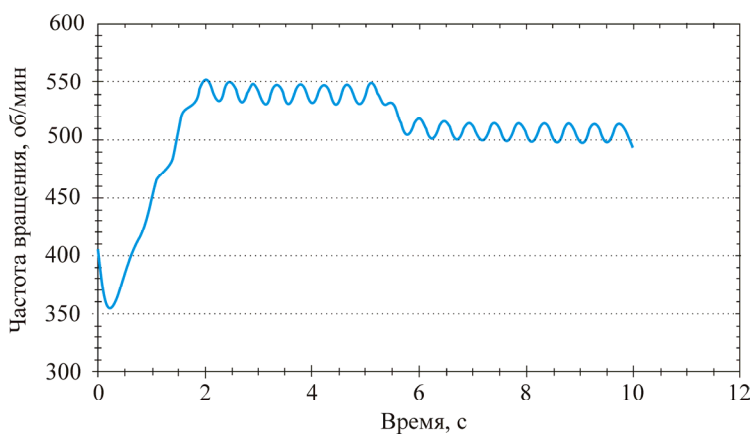


Рис. 2. Зависимость частоты вращения электропривода от времени

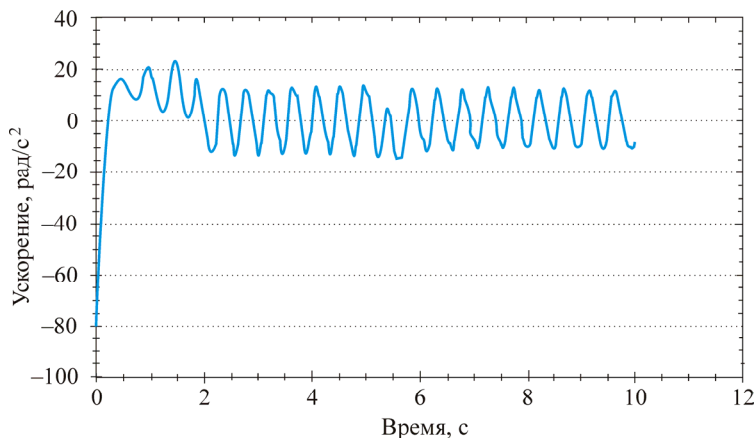


Рис. 3. Зависимость углового ускорения электропривода от времени

наличие забросов контролируемых параметров, позволяющих оценить качество функционирования системы автоматического регулирования.

Приведенные на рисунках зависимости частоты вращения и углового ускорения в процессе увеличения частоты электропривода технологического оборудования получены с помощью разработанного в Сибирском государственном университете путей сообщения программного обеспечения и измерительного оборудования для контроля неравномерности процессов вращения [13, 14]. Параметрическая оценка вращательного движения валов основывается на измерении угловой скорости путем расчета значений времени прихода передних фронтов цифровых сигналов от датчика вращения, представляющего собой энкодер с оптическим диском, имеющим 360 меток на один оборот. Необходимая точность измерений задается с помощью заложенной в программных продуктах возможности изменения характера представления полученной информации на основе параметров сглаживания Гаусса. При обработке сигналов учитывается также разработанный ранее математический аппарат для исследования сложных колебательных процессов в узлах и агрегатах машин [15].

Из представленных графиков видно, что качество любого переходного процесса можно оценить по величинам заброса угловой скорости и углового ускорения, причем максимальные экстремальные значения углового ускорения более информативны и в большей мере пригодны для приборной реализации предлагаемой методики контроля. Разработанный программно-измерительный комплекс фиксирует

приведенные на рис. 2 и 3 зависимости как в графическом, так и в табличном виде, обеспечивает вывод на экран персонального компьютера величину параметра в конкретной точке графика и позволяет с высокой точностью оценивать характеристики нестабильности установившейся частоты вращения. При использовании вместо датчика частоты вращения цифровых или аналоговых датчиков перемещения и обработки сигналов с помощью входящего в комплекс аналого-цифрового преобразователя возможна оценка неравномерности движения и характера переходных процессов в механизмах подачи суппортов, столов и т.п. Изменение технического состояния систем автоматического регулирования в процессе эксплуатации оценивается по отклонению величины амплитудных значений углового ускорения от эталонных, измеренных при исправном состоянии системы.

Список литературы

1. Аксенов В.А., Евсеев Д.Г., Фомин В.А. Технологические процессы механообработки и сборки при ремонте подвижного состава. – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2001. – 520 с.

2. Бармин Б.Л. Вибрации и режимы резания. – М.: Машиностроение, 1972. – 70 с.

3. Кедров С.С. Колебания металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1978. – 199 с.

4. Динамические характеристики ДВС / С.С. Глушков, С.П. Глушков, А.В. Савельев, А.С. Ярославцева // Сибир. науч. вестник. – Новосибирск, 2007. – № X. – С. 164–167.

5. Кочергин В.И., Самойлов С.В. Технология диагностирования систем автоматического регулирования частоты вращения дизельных ДВС // Инженерно-техническое обеспечение производственных коллективов АПК: сб. науч. тр. / Сиб. отд-е ВАСХНИЛ. – Новосибирск, 1989. – С. 46–49.

6. Кочергин В.И. Диагностирование систем автоматического регулирования частоты вращения дизельных двигателей по параметрам переходных процессов в эксплуатационных условиях: дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 1989. – 137 с.

7. Кочергин В.И., Алехин А.С. Оценка технического состояния систем автоматического регулирования частоты вращения // Научные

проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – Новосибирск, 2014. – № 3. – С. 156–160.

8. Шнепс В.А. Экспериментальное исследование влияния синусоидального изменения скорости на устойчивость резания // Вопросы динамики и прочности. – Рига: Зинатне, 1970. – Вып. 20 – С. 123–130.

9. Левин А.И. Методы автоматического управления уровнем колебаний в металлорежущих станках // Станки и инструмент. – М., 1973. – № 3. – С. 30–32.

10. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем. – М.: Машиностроение, 1973. – 606 с.

11. Сычев А.М. Повышение эффективности дизелей совершенствованием энергетических характеристик регуляторов частоты вращения непрямого действия: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Саратов, 2004. – 20 с.

12. Совершенствование методологии измерения крутильных колебаний / С.С. Глушков, С.П. Глушков, И.А. Круглов, А.А. Иванов. – Вестник Мурманск. гос. техн. ун-та, 2015. – Т. 18, № 4. – С. 700–708.

13. Алехин А.С., Кочергин В.И., Манаков А.Л. Выбор оптимальных диагностических параметров с целью обеспечения работоспособности машин в процессе эксплуатации // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании: сб. науч. тр. Sworld. – Одесса: Черноморье, 2011. – Т. 2, вып. 4. – С. 50–52.

14. Алехин А.С., Кочергин В.И., Манаков А.Л. Использование внутрицикловых параметров вращения коленчатого вала для оценки технического состояния двигателей внутреннего сгорания // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока / Новосиб. гос. академия водного транспорта. – Новосибирск, 2013. – № 1. – С. 178–182.

15. Глушков С.П. Виброизоляция тепловых двигателей / Новосиб. гос. академия водного транспорта. – Новосибирск, 1999. – 215 с.

References

1. Aksenov V.A., Evseev D.G, Fomin V.A. Tekhnologicheskie processy mekhanooobrabotki i sborki pri remonte podvizhnogo sostava [Technological processes of a machining job and assembly at repair of a rolling stock]. Novosibirsk: SGUPS, 2001. 520 p.

2. Barmin B.L. Vibratsii i rezhimy rezaniia [Vibrations and modes of cutting]. Moscow: Mashinostroenie, 1972. 70 p.

3. Kedrov S.S. Kolebaniia metallorezhushchikh stankov [Fluctuations of metal-cutting machines]. Moscow: Mashinostroenie, 1978. 199 p.

4. Glushkov S.S., Glushkov S.P., Savel'ev A.V., Iaroslavtseva A.S. Dinamicheskie kharakteristiki DVS [Dynamic characteristics of internal combustion engines]. *Sibirskii nauchnyi vestnik. Novosibirskii gosudarstvennyi universitet vodnogo transporta*, 2007, no. X, pp. 164-167.

5. Kochergin V.I., Samoilov S.V. Tekhnologiya diagnostirovaniia sistem avtomaticheskogo regulirovaniia chastoty vrashcheniia dizel'nykh DVS [Technology of diagnosing of the systems of automatic control of frequency of rotation of diesel combustion engines]. *Inzhenerno-tekhnicheskoe obespechenie proizvodstvennykh kollektivov APK. Novosibirsk*, 1989, pp. 46-49.

6. Kochergin V.I. Diagnostirovanie sistem avtomaticheskogo regulirovaniia chastoty vrashcheniia dizel'nykh dvigatelei po parametram perekhodnykh protsessov v ekspluatatsionnykh usloviakh [Diagnosing of systems of automatic control of frequency of rotation of diesel engines in parameters of transition processes in operational conditions]. Ph. D. thesis. Novosibirsk, 1989. 137 p.

7. Kochergin V. I., Alekhin A. S. Otsenka tekhnicheskogo sostoiianiia sistem avtomaticheskogo regulirovaniia chastoty vrashcheniia [Assessment of technical condition of systems of automatic control of frequency of rotation]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. Novosibirskii gosudarstvennyi universitet vodnogo transporta*, 2014, no. 3, pp. 156-160.

8. Shneps V.A. Eksperimental'noe issledovanie vliianiia sinusoidal'nogo izmeneniia skorosti na ustoichivost' rezaniia [Pilot study of influence of sinusoidal change of speed on stability of cutting]. *Voprosy dinamiki i prochnosti. Riga: Zinatne*, 1970, no. 20, pp. 123-130.

9. Levin A.I. Metody avtomaticheskogo upravleniia urovнем kolebaniia v metallorezhushchikh stankakh [Methods of automatic control of the level of fluctuations in metal-cutting machines]. *Stanki i instrument. Moscow*, 1973, no. 3, pp. 30-32.

10. Ivashchenko N.N. Avtomaticheskoe regulirovanie. Teoriia i elementy sistem [Automatic control. Theory and elements of systems]. Moscow: Mashinostroenie, 1973. 606 p.

11. Sychev A.M. Povyshenie effektivnosti dizelei sovershenstvovaniem energeticheskikh kharakteristik regulatorov chastoty vrashcheniia nepriamogo deistviia [Increase of efficiency of diesels improvement of power characteristics of regulators of frequency of rotation of indirect action]. Abstract of the Ph. D. thesis. Saratov, 2004. 20 p.

12. Glushkov S.S., Glushkov S.P., Kruglov I.A., Ivanov A.A. Sovershenstvovanie metodologii izmereniia krutil'nykh kolebaniy [Improvement of methodology of measurement of torsional fluctuations]. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. Murmansk, 2015, vol. 18, no. 4, pp. 700-708.

13. Alekhin A.S., Kochergin V.I., Manakov A.L. Vybor optimal'nykh diagnosticheskikh parametrov s tsel'iu obespecheniia rabotosposobnosti mashin v protsesse ekspluatatsii [Choice of optimal diagnostic parameters with the purpose of providing of capacity of machines in the process of exploitation]. *Sovremennye problemy i puti ikh resheniia v nauke, transporte, proizvodstve i obrazovanii*. Odessa: Sworld, 2011, vol. 2, iss. 4, pp. 50-52.

14. Alekhin A.S., Kochergin V.I., Manakov A.L. Ispol'zovanie vnutritsiklovykh parametrov vrashcheniia kolenchatogo vala dlia otsenki tekhnicheskogo sostoianiia dvigatelyi vnutrennego sgoraniia [Use into a cycle parameters of the crankshaft to assess the technical condition of internal combustion engines]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. Novosibirskii gosudarstvennyi universitet vodnogo transporta, 2013, no. 1, pp. 178-182.

15. Glushkov S.P. Vibroizoliatsiia teplovykh dvigatelyi [Vibroisolation of heat-engines]. Novosibirskii gosudarstvennyi universitet vodnogo transporta, 1999. 215 p.

Получено 26.06.2016

Сведения об авторах

Кочергин Виктор Иванович (Новосибирск, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» Сибирского государственного университета путей сообщения; e-mail: vkplus2011@yandex.ru.

Глушков Сергей Павлович (Новосибирск, Россия) – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология транс-

портного машиностроения и эксплуатация машин» Сибирского государственного университета путей сообщения; e-mail: rcpl@ngs.ru.

About the authors

Victor I. Kochergin (Novosibirsk, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Technology of Transport Mechanical Engineering and Operation of Cars, Siberian State Transport University; e-mail: vkplus2011@yandex.ru.

Sergei P. Glushkov (Novosibirsk, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Technology of Transport Mechanical Engineering and Operation of Cars, Siberian State Transport University; e-mail: rcpl@ngs.ru.