

УДК 621.855.74

Экспериментальное определение диссипативных характеристик муфты переменной жесткости со змеевидной пружиной при крутильных колебаниях

М.А. Карнаухов¹, М.А. Любченко¹, С.В. Палочкин¹, П.Н. Рудовский²

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана

² Костромской государственной университет

Experimental determination of dissipative characteristics of the variable-stiffness serpentine spring coupling under the torsional vibrations

M.A. Karnauhov¹, M.A. Ljubchenko¹, S.V. Palochkin¹, P.N. Rudovsky²

¹ Bauman Moscow State Technical University

² Kostroma State University

Проведено экспериментальное исследование диссипативных свойств муфт переменной жесткости со змеевидной пружиной, достаточно широко применяемых в приводах изделий станкостроения и тяжелого машиностроения, работающих при высоких динамических нагрузках. Исследование выполнено на базе известного экспериментального метода статической петли гистерезиса. Рассмотрен наиболее характерный случай крутильных колебаний, связанных с закручиванием соединяемых муфтой валов привода. Описаны специально спроектированный и изготовленный лабораторный стенд для испытаний, методика их выполнения и экспериментальный образец муфты. Приведены полученные путем испытаний значения количественных характеристик диссипативных свойств — коэффициентов поглощения (относительного рассеяния) муфты. Выполнен анализ полученных экспериментальных данных. Результаты исследования могут быть использованы в динамических расчетах приводов машин различного отраслевого назначения при рассмотренном виде колебаний.

EDN: OOOZHS, <https://elibrary/ooozhs>

Ключевые слова: привод машины, муфта со змеевидной пружиной, переменная жесткость, крутильные колебания, рассеяние энергии, коэффициент поглощения

The paper presents results of an experimental study of dissipative properties of the variable-stiffness serpentine spring couplings. These couplings are fairly widely used in the drives for machine tools and heavy engineering applications operating under the high dynamic loads. The study applies the well-known experimental method of a static hysteresis loop. The paper considers a most typical case of the torsional vibrations associated with twisting of the drive shafts connected by the coupling. It describes a specially designed and manufactured laboratory testing bench, testing methodology, and an experimental coupling prototype. The paper provides quantitative characteristics of the coupling dissipative properties including the coupling dissipation coefficients (relative scattering). It analyzes the obtained experimental data. Study results could be used in dynamic computation of the machine drives for various industrial applications under the type of vibration considered.

EDN: OOOZHS, <https://elibrary/ooozhs>

Keywords: machine drive, serpentine spring coupling, variable stiffness, torsional vibrations, energy dissipation, absorption coefficient

Одной из основных современных тенденций развития машиностроения является рост производительности машин, связанный с увеличением их мощности и быстроходности, который ведет к повышению динамических нагрузок на узлы и детали машин и возрастанию влияния сопутствующих вибраций на их работу.

Для выполнения динамических расчетов виброустойчивости машины и разработки практических рекомендаций по ее повышению важно знать диссипативные свойства ее узлов и деталей. Количественными характеристиками этих свойств [1] являются рассеяние энергии за цикл колебаний W и коэффициент поглощения (относительное рассеяние) ψ . Аналитическое определение этих параметров связано с созданием математических моделей разной сложности. Точность результатов расчета зависит от принятых допущений и адекватности построенных моделей реальному процессу рассеяния энергии в контактах деталей и их материалах. Поэтому надежные оценки демпфирования колебаний часто можно получить только экспериментальным путем.

В приводах общемашиностроительного назначения широко применяются упругие ком-

пенсирующие муфты, которые передают движение с вала на вал, компенсируя их несоосность, снижают динамические нагрузки и демпфируют крутильные и другие виды возникающих колебаний.

Диссипативные свойства муфт с упругими неметаллическими элементами достаточно хорошо изучены и изложены в базовых работах по этой теме [2–5]. Публикаций исследований (особенно экспериментальных) рассеяния энергии колебаний в муфтах с упругими металлическими элементами мало [6–13], и они носят достаточно разрозненный и неполный характер. В связи с этим тема настоящего исследования является актуальной и практически значимой.

Муфты переменной жесткости со змеевидной пружиной получили достаточно широкое применение в приводах изделий станкостроения и тяжелого машиностроения, работающих под действием высоких динамических нагрузок.

Исследован наиболее характерный случай крутильных колебаний, связанных с закручиванием соединяемых этой муфтой валов привода.

Цель работы — экспериментальное изучение и определение количественных характеристик рассеяния энергии в муфте переменной жесткости со стальной змеевидной пружиной при крутильных колебаниях.

Исследование выполнено на базе известного экспериментального метода статической петли гистерезиса [1, 6], который рекомендуется использовать при характерном для данных муфт значительном рассеянии энергии колебаний [7] и наличии точной измерительной аппаратуры.

Для исследования диссипативных свойств муфты спроектирован и изготовлен стенд (рис. 1), конструкция которого для снижения рассеяния энергии в стыках его деталей и фундаменте отвечает следующим требованиям: обеспечение высокой жесткости и массивности основания, высоких напряжений их затяжки и применение конструкции с минимальным числом стыков.

Стенд базируется на стальной плите 4 массой около 2000 кг, которая закреплена на бетонном основании фундаментными болтами. Две массивные стальные стойки 6 и 15 непо-

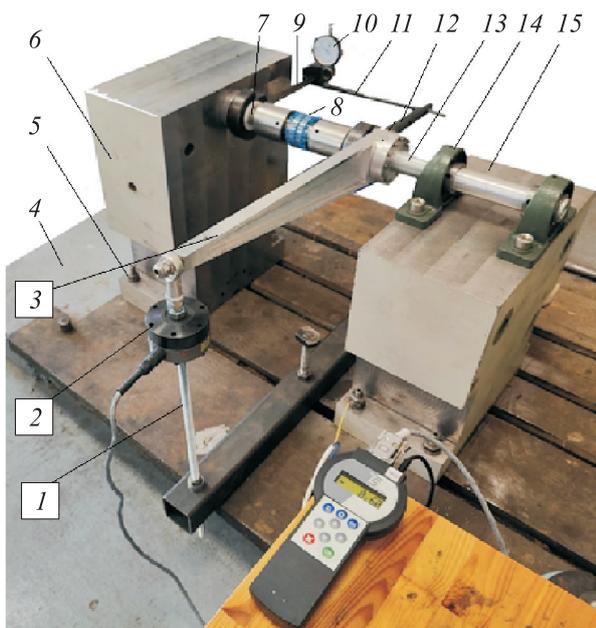


Рис. 1. Внешний вид стенда для исследования диссипативных свойств муфты

движно соединены с плитой затянутыми резьбовыми соединениями 5. При сборке стенда и установке на нем опытного образца упругой муфты 8 стойки разного типоразмера могут перемещаться вдоль пазов плиты при незатянутых резьбовых соединениях. Неподвижный вал 7 закреплен на стойке 6 винтами. Вал 13, установленный на двух опорах 14 с шариковыми радиальными однорядными подшипниками качения, имеет возможность поворачиваться вокруг своей оси. Подшипниковые опоры закреплены на стойке 15 винтами. Полумуфты соединены с валами через переходные втулки с помощью штифтовых соединений.

Для создания вращающего момента T , воздействующего на вал 13 и поворачивающего правую полумуфту относительно левой, применен неподвижно установленный на нем рычаг 3 и винтовой домкрат (передача винт-гайка) 1 со встроенным электронным динамометром 2 марки GTM (рис. 2), позволяющим контролировать значение действующей нагрузки F на конце рычага.

Вращающий момент рассчитывается как

$$T = FL,$$

где L — плечо (рабочая длина) рычага, т. е. расстояние от точки приложения к рычагу нагрузки F с помощью домкрата до оси вращения вала 13, $L = 445$ мм.

Для определения углов относительного поворота (закручивания) φ полумуфт использо-



Рис. 2. Внешний вид электронного динамометра марки GTM



Рис. 3. Внешний вид индикатора часового типа ИЧ 0-10 0.01 марки Калиброн

ван часовой индикатор типа ИЧ 0-10 0.01 марки Калиброн 10 (рис. 3), корпус которого неподвижно соединен с левым малым рычагом 9, а подвижная ножка индикатора упирается в лопатку 11 правого малого рычага 12. Рычаги 9 и 12 жестко закреплены соответственно на валах 7 и 13 с помощью клеммовых соединений. Угол закручивания полумуфт определяется выражением

$$\varphi = s/l,$$

где s — перемещение ножки индикатора часового типа; l — плечо (рабочая длина) малых рычагов 9 и 12, т. е. расстояние от точки касания ножки индикатора лопатки до оси вращения вала 13, $l = 205$ мм.

В качестве опытного образца использована муфта переменной жесткости со змеевидной пружиной шведской фирмы SKF типоразмера Grid Couplings 1020TGV с максимальным вращающим моментом $T_{\max} = 52$ Н·м [14]. На рис. 1 эта муфта показана без устанавливаемого в процессе исследования составного металлического кожуха с плоскостью разъема, перпендикулярной ее оси вращения.

На базе ранее апробированных методик проведения аналогичных испытаний других машиностроительных узлов [6, 12, 15, 16] разработана методика проведения экспериментов, включающая в себя следующие основные этапы.

Этап 1. Исследуемый образец муфты устанавливают на стенд и подвергают ступенчатой циклической нагрузке-разгрузке вращающим моментом T с одновременной регистрацией ее значений и соответствующих им углов относительного поворота полумуфт φ . Так как рас-

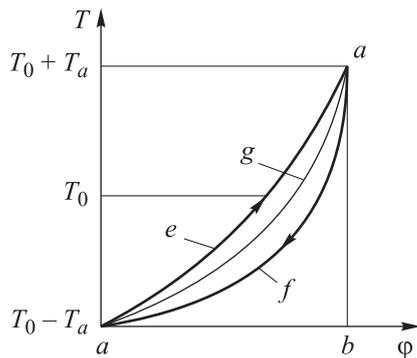


Рис. 4. Диаграмма статической нагрузки–разгрузки муфты

смаатриваемый вид муфты имеет переменную (нелинейную) крутильную жесткость, испытания проводят при цикле нагрузки–разгрузки [17] с максимальным $T_{\max} = T_0 + T_a$ и минимальным $T_{\min} = T_0 - T_a$ значениями момента, где T_0 и T_a — среднее за цикл значение момента T и его амплитуда колебаний (рис. 4). Этот этап эксперимента при фиксированных значениях параметров T_0 и T_a выполняют с малой выборкой, составляющей 7–10 испытаний.

Этап 2. На базе полученных экспериментальных значений параметров T и φ строят диаграмму циклической нагрузки–разгрузки опытного образца муфты, имеющей вид статической петли гистерезиса *seafc* (см. рис. 4), на основании которой определяют характеристики упругих и демпфирующих свойств муфты. Кривая *sga* дает возможность вычислить крутильную жесткость муфты на любой ступени ее нагружения и разгружения. Рассеяние энергии за цикл нагружения W эквивалентно площади петли *seafc* A_p , а полная энергия деформации упругого элемента муфты E — площади фигуры *sgabc* A_E . Коэффициент поглощения рассчитывают по формуле $\psi = W/E = A_p/A_E$, где значения площадей определяют методом планиметрии.

Этап 3. Выполняют статистическую обработку [18] результатов расчета коэффициента поглощения ψ для определения его среднего значения и доверительных интервалов при заданных значениях параметров T_0 и T_a .

Этап 4. Для изучения влияния параметров муфты и колебательного процесса на ее демпфирующую способность проводят испытания при различных сочетаниях значений варьируемых параметров.

Результаты статистической обработки полученных при испытаниях данных — средние значения коэффициента поглощения муфты

Средние значения коэффициента поглощения муфты со змеевидной пружиной переменной жесткости

Амплитуда колебаний момента T_a , Н·м	Коэффициент поглощения ψ при среднем за цикл значении момента T_0 , Н·м	
	40	32
4	0,62	0,49
5	0,53	0,42
6	0,46	0,36
7	0,41	0,32
8	0,37	0,29
9	0,33	0,26
10	0,30	0,24

переменной жесткости со змеевидной пружиной — приведены в таблице. Их доверительные интервалы лежат в пределах $\pm 0,06 \dots 0,11$ при уровне значимости 0,05 и числе повторов испытаний, равном 10, на каждом из этапов экспериментов.

Как следует из таблицы, значения коэффициентов поглощения муфты находятся в диапазоне $\psi = 0,24 \dots 0,62$ и растут с увеличением среднего за цикл значения момента T_0 , т. е. номинального вращающего момента, а также уменьшаются с ростом амплитуды колебаний T_a передаваемого муфтой момента.

Данные эксперимента качественно совпадают с результатами ранее выполненных теоретических численных расчетов [13] относительно рассеяния энергии в муфте того же типоразмера, но превышают их количественные значения в среднем на 13...15%. Такое расхождение обусловлено тем, что при испытаниях имеет место не только рассеяние энергии вследствие потерь на трение скольжения в сопряжениях пружины с зубьями полумуфт, но и неучтенные в теоретическом исследовании дополнительные потери энергии, связанные с закручиванием валов, упругими контактными деформациями в стыках деталей конструкции стенда и внутренним трением в их материалах.

В условиях проведения экспериментов не выявлено влияние осевого смещения полумуфт в диапазоне 1,5 ... 4,5 мм на коэффициент ψ , так как точность полученных результатов оказалась сопоставима с их статистической погрешностью. Очевидно, что для определения влияния этого и других конструктивных параметров

муфт на их диссипативные свойства необходимо провести испытания с опытными образцами большего типоразмера.

В целом полученные результаты оказались хорошо согласованными с обобщенными экспериментальными данными [7, 10, 12], согласно которым коэффициент поглощения находится в диапазоне $\psi = 0,13 \dots 0,65$.

Выводы

1. Упругие муфты со змеевидной стальной пружиной переменной жесткости обладают высокой демпфирующей способностью. Их диссипативные характеристики в виде экспериментальных значений коэффициента поглощения,

полученных в условиях проведения испытаний, лежат в диапазоне $0,24 \dots 0,62$

2. По результатам испытаний установлено, что относительное рассеяние энергии в муфте увеличивается с ростом среднего за цикл значения момента, передаваемого муфтой, и уменьшается с ростом амплитуды колебаний этого момента, что согласуется с данными ранее выполненного теоретического исследования [13].

3. Полученные экспериментальные значения коэффициента поглощения достаточно хорошо согласуются с аналогичными данными, приведенными в публикациях [7, 10, 12], что может служить подтверждением достоверности полученных результатов.

Литература

- [1] Фролов К.В., ред. *Вибрации в технике*. Т. 6. Защита от вибраций и ударов. Москва, Машиностроение, 1981. 456 с.
- [2] Решетов Д.Н., Ряховский О.А. Исследование демпфирующих свойств муфт с неметаллическими упругими элементами. *Известия высших учебных заведений СССР. Машиностроение*, 1966, № 5, с. 30–32.
- [3] Ряховский О.А. *Разработка конструкций, исследования, расчеты и стандартизация муфт с неметаллическими упругими элементами*. Дисс. ... док. тех. наук. Москва, 1985. 302 с.
- [4] Михайлов Ю.К. *Основы теории, методы расчета и проектирования муфт с упругими элементами из эластомерных материалов*. Дисс. ... док. тех. наук. Ленинград, 1985. 367 с.
- [5] Лысенко А.П., Ярцев Б.А. Композиционные упругие муфты. *Труды Крыловского государственного научного центра*, 2018, № 1, с. 13–28.
- [6] Палочкин С.В. *Исследование и расчет демпфирования колебаний в контактах деталей машин*. Дисс. ... канд. тех. наук. Москва, 1983. 198 с.
- [7] Решетов Д.Н. *Детали машин*. Москва, Машиностроение, 1989. 496 с.
- [8] Мак В.И. Сравнительная оценка упругих муфт с пластинчатыми пружинами при соединении валов турбины и компрессора. *Компрессорное и энергетическое машиностроение*, 2006, № 4, с. 43–46.
- [9] Filipowicz K. Determining of the static characteristics of a torsionally flexible metal coupling. *Acta Montanistica Slovaca*, 2007, vol. 12, no. 4, pp. 304–308.
- [10] Decker K.H. *Maschinenelemente. Funktion, Gestaltung und Berechnung*. Carl Hanser, 2011. 775 p.
- [11] Палочкин С.В., Карнаухова М.А. Демпфирование крутильных колебаний в линейной муфте со змеевидной пружиной. *Технологии и качество*, 2019, № 2, с. 41–47.
- [12] Палочкин С.В., Любченко М.А., Карнаухова М.А. Экспериментальное исследование рассеяния энергии крутильных колебаний в муфте со змеевидной пружиной. *Современные проблемы теории машин*, 2020, № 9, с. 37–41, doi: <https://doi.org/10.26160/2307-342X-2020-9-37-41>
- [13] Палочкин С.В., Карнаухова М.А., Любченко М.А. и др. Рассеяние энергии в муфтах переменной жесткости со змеевидной пружиной при крутильных колебаниях. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 6, с. 3–11, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2023-6-3-11>
- [14] SKF Couplings, 2010. URL: http://skf.indpart.ru/images/upload/file/6897_EN_SKF_Couplings.pdf (дата обращения: 10.02.2025).

- [15] Колягин А.Ю., Палочкин С.В. Экспериментальные исследования демпфирования колебаний в крутильно-мотальном механизме. *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*, 2009, № S2, с. 91–95.
- [16] Лабай Н.Ю., Палочкин С.В. Экспериментальные исследования демпфирования колебаний в приемно-намоточном механизме. *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*, 2013, № 2, с. 121–125.
- [17] Мальтеев М.А., Карташов Г.Г., Юдин В.А. Анализ способов оценки рассеяния энергии в устройствах конструкционного демпфирования. *Вестник СГАУ им. Академика С.П. Королева*, 2006, № 2-1, с. 224–229.
- [18] Севостьянов А.Г. *Методы и средства исследования механико-технологических процессов текстильной промышленности*. Москва, Легкая индустрия, 1980. 392 с.

References

- [1] Frolov K.V., ed. *Vibratsii v tekhnike*. T. 6. Zashchita ot vibratsiy i udarov [Vibrations in engineering. Vol. 6. Protection from vibrations and shocks.]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 456 p. (In Russ.).
- [2] Reshetov D.N., Ryakhovskiy O.A. Investigation of damping properties of couplings with nonmetallic elastic elements. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy SSSR. Mashinostroenie*, 1966, no. 5, pp. 30–32. (In Russ.).
- [3] Ryakhovskiy O.A. *Razrabotka konstruktсий, issledovaniya, raschety i standartizatsiya muft s nemetallicheskimy uprugimi elementami*. Diss. dok. tekhn. nauk [Development of constructions, researches, calculations and standardization of couplings with non-metallic elastic elements. Doc. Tech. sci. diss.]. Moscow, 1985. 302 p. (In Russ.).
- [4] Mikhaylov Yu.K. *Osnovy teorii, metody rascheta i proektirovaniya muft s uprugimi elementami iz elastomernykh materialov*. Diss. dok. tekhn. nauk [Fundamentals of the theory, methods of calculation and designing of couplings with elastic elements from elastomeric materials. Doc. Tech. sci. diss.]. Leningrad, 1985. 367 p. (In Russ.).
- [5] Lysenko A.P., Yartsev B.A. Elastic composite couplings. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra* [Transactions of the Krylov State Research Centre], 2018, no. 1, pp. 13–28. (In Russ.).
- [6] Palochkin S.V. *Issledovanie i raschet dempfirovaniya kolebaniy v kontaktakh detaley mashin*. Diss. kand. tekhn. nauk [Research and calculation of vibration damping in contacts of machine parts. Kand. tech. sci. diss.]. Moscow, 1983. 198 p. (In Russ.).
- [7] Reshetov D.N. *Detali mashin* [Parts of machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 496 p. (In Russ.).
- [8] Mak V.I. Comparative evaluation of elastic couplings with plate springs at connection of turbine and compressor shafts. *Kompressornoe i energeticheskoe mashinostroenie*, 2006, no. 4, pp. 43–46. (In Russ.).
- [9] Filipowicz K. Determining of the static characteristics of a torsionally flexible metal coupling. *Acta Montanistica Slovaca*, 2007, vol. 12, no. 4, pp. 304–308. (In Russ.).
- [10] Decker K.H. *Maschinenelemente. Funktion, Gestaltung und Berechnung*. Carl Hanser, 2011. 775 p.
- [11] Palochkin S.V., Karnaukhov M.A. Torsional vibration damping in a linear coupling with serpentine spring. *Tekhnologii i kachestvo* [Technologies & Quality], 2019, no. 2, pp. 41–47. (In Russ.).
- [12] Palochkin S.V., Lyubchenko M.A., Karnaukhov M.A. Experimental research of the dispersion of energy of torsional vibrations in a serpentine spring coupling. *Sovremennyye problemy teorii mashin* [Modern Problems of the Theory of Machines], 2020, no. 9, pp. 37–41, doi: <https://doi.org/10.26160/2307-342X-2020-9-37-41> (In Russ.).
- [13] Palochkin S.V., Karnaukhov M.A., Lyubchenko M.A. et al. Energy dissipation in the variable stiffness couplings with a serpentine spring at the torsional vibrations. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2023, no. 6, pp. 3–11, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2023-6-3-11> (in Russ.).
- [14] SKF *Couplings*, 2010. URL: http://skf.indpart.ru/images/upload/file/6897_EN_SKF_Couplings.pdf (дата обращения: 10.02.2025).

- [15] Kolyagin A.Yu., Palochkin S.V. Experimental studies of vibration damping in a torsion-winding mechanism. *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstilnoy promyshlennosti* [Textile Industry Technology. Ser. Proceedings of Higher Educational Institutions], 2009, no. S2, pp. 91–95. (In Russ.).
- [16] Labay N.Yu., Palochkin S.V. Experimental research of vibrations damping in a reeling mechanism. *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstilnoy promyshlennosti* [Textile Industry Technology. Ser. Proceedings of Higher Educational Institutions], 2013, no. 2, pp. 121–125. (In Russ.).
- [17] Malteev M.A., Kartashov G.G., Yudin V.A. Analysis of methods of evaluation of energy dispersion in constructive damping devices. *Vestnik SGAU im. Akademika S.P. Koroleva* [Vestnik of the Samara State Aerospace University], 2006, no. 2-1, pp. 224–229. (In Russ.).
- [18] Sevostyanov A.G. *Metody i sredstva issledovaniya mekhaniko-tekhnologicheskikh protsessov tekstilnoy promyshlennosti* [Methods and means of research of mechanic-technological processes of textile industry]. Moscow, Legkaya industriya Publ., 1980. 392 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 19.03.2025

Информация об авторах

КАРНАУХОВ Максим Алексеевич — аспирант кафедры «Основы конструирования машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: maxkarn@mail.ru).

ЛЮБЧЕНКО Михаил Алексеевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Основы конструирования машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: ma.ljubchenko@yandex.ru).

ПАЛОЧКИН Сергей Владимирович — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Основы конструирования машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: palnigs@mail.ru).

РУДОВСКИЙ Павел Николаевич — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Теория механизмов и машин, детали машин и проектирование технологических машин». Костромской государственный университет (156005, Кострома, Российская Федерация, ул. Дзержинского, д. 17, e-mail: pavel_rudovsky@mail.ru).

Information about the authors

KARANAUKHOV Maxim Alekseevich — Postgraduate, Department of Fundamentals of Machine Design. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: maxkarn@mail.ru).

LYUBCHENKO Mikhail Alekseevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Fundamentals of Machine Design. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: ma.ljubchenko@yandex.ru).

PALOCHKIN Sergey Vladimirovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Professor of Department of Fundamentals of Machine Design. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: palnigs@mail.ru).

RUDOVSKY Pavel Nikolaevich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Professor of Department of Theory of Mechanisms and Machines, Machine Parts and Design of Technological Machines. Kostroma State University (156005, Kostroma, Russian Federation, Dzerzhinskiy St., Bldg. 17, e-mail: pavel_rudovsky@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Карнаухов М.А., Любченко М.А., Палочкин С.В., Рудовский П.Н. Экспериментальное определение диссипативных характеристик муфты переменной жесткости со змеевидной пружины при крутильных колебаниях. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 10, с. 13–19.

Please cite this article in English as:

Karnauhov M.A., Ljubchenko M.A., Palochkin S.V., Rudovsky P.N. Experimental determination of dissipative characteristics of the variable-stiffness serpentine spring coupling under the torsional vibrations. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 10, pp. 13–19.