

Научная статья  
УДК 629.5  
<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2024-1-95-103>  
EDN MEPTMY

## Сравнительная оценка применения микроэлектромеханических акселерометров для измерения крутильных колебаний судовых машинно-двигательных комплексов

*Максим Михайлович Горбачев<sup>1</sup>, Артем Владиславович Дьяченко<sup>2</sup>✉,  
Дмитрий Георгиевич Конищев<sup>3</sup>, Андрей Геннадьевич Кокуев<sup>4</sup>*

<sup>1, 2, 4</sup>*Астраханский государственный технический университет,  
Астрахань, Россия, [sadwyn1997@gmail.com](mailto:sadwyn1997@gmail.com)✉*

<sup>3</sup>*ООО «Р Шиппинг»,  
Астрахань, Россия*

**Аннотация.** Исследуются микроэлектромеханические акселерометры, проведена оценка применимости их для измерения крутильных колебаний, возникающих в судовых машинно-двигательных комплексах. Произведена расчетная и экспериментальная оценка применимости акселерометров моделей ADXL345, ADXL375 и H3LIS331DL для измерения крутильных колебаний судовых валопроводов и разработаны рекомендации для их практического применения. В качестве материалов были использованы правила Российского классификационного общества, научно-техническая литература в области крутильных колебаний и собственные исследования авторов. В качестве методов применялись анализ, численный и физический эксперимент. Получены рекомендации по использованию акселерометров моделей ADXL345, ADXL375 и H3LIS331DL в зависимости от частоты вращения и диаметра торсиографируемого вала. Полученные результаты дают основание рекомендовать акселерометр ADXL375 как основную базовую модель для измерения крутильных колебаний большинства судовых машинно-двигательных комплексов с частотами вращения до 1 025 мин<sup>-1</sup>. При частотах вращения менее 135 мин<sup>-1</sup> рекомендовано применение акселерометра ADXL345 с диапазоном измерения  $\pm 2g$ , а при настройке диапазона  $\pm 16g$  возможно его применение при частотах вращения до 380 мин<sup>-1</sup>. В случае необходимости измерения крутильных колебаний при частоте вращения более 1 025 мин<sup>-1</sup> рекомендовано использование менее точного, но более надежного по порогу отключения от перегрузки акселерометра модели H3LIS331DL.

**Ключевые слова:** судовые машинно-двигательные комплексы, крутильные колебания, микроэлектромеханические акселерометры, торсиографирование, валопровод

**Для цитирования:** Горбачев М. М., Дьяченко А. В., Конищев Д. Г., Кокуев А. Г. Сравнительная оценка применения микроэлектромеханических акселерометров для измерения крутильных колебаний судовых машинно-двигательных комплексов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2024. № 1. С. 95–103. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2024-1-95-103>. EDN MEPTMY.

Original article

## Comparative assessment of microelectromechanical accelerometers use for measuring torsional vibrations of marine propulsion systems

*Maksim M. Gorbachev<sup>1</sup>, Artem V. Diachenko<sup>2</sup>✉, Dmitry G. Konishchev<sup>3</sup>, Andrey G. Kokuev<sup>4</sup>*

<sup>1, 2, 4</sup>*Astrakhan State Technical University,  
Astrakhan, Russia, [sadwyn1997@gmail.com](mailto:sadwyn1997@gmail.com)✉*

<sup>3</sup>*R Shipping, LLC,  
Astrakhan, Russia*

**Abstract.** Microelectromechanical accelerometers are investigated, and their applicability to measuring torsional vibrations occurring in marine propulsion systems is evaluated. The calculated and experimental assessment of the applicability of accelerometers of the ADXL345, ADXL375 and H3LIS331DL models for measuring torsional vibrations of marine shaft lines has been carried out and recommendations for their practical application have been developed. The materials used were the rules of the Russian Classification Society, scientific and technical literature in the field of torsional vibrations and the authors' own research. The methods used were analysis, numerical and physical experiment. Recommendations on the use of accelerometers of the ADXL345, ADXL375 and H3LIS331DL models depending on the rotational speed and diameter of the torsionographed shaft are obtained. The results obtained give grounds to recommend the ADXL375 accelerometer as the basic model for measuring torsional vibrations of most marine propulsion systems with rotation frequencies up to  $1,025 \text{ min}^{-1}$ . At rotational speeds of less than  $135 \text{ min}^{-1}$ , the use of the ADXL345 accelerometer with a measuring range of  $\pm 2g$  is recommended, and when setting the range of  $\pm 16g$ , it can be used at rotational speeds up to  $380 \text{ min}^{-1}$ . If it is necessary to measure torsional vibrations at a rotational speed of more than  $1,025 \text{ min}^{-1}$ , it is recommended to use a less accurate, but more reliable accelerometer model H3LIS331DL in terms of overload shutdown threshold.

**Keywords:** ship propulsion systems, torsional vibrations, microelectromechanical accelerometers, torsionography, shafting system

**For citation:** Gorbachev M. M., Diachenko A. V., Konishchev D. G., Kokuev A. G. Comparative assessment of microelectromechanical accelerometers use for measuring torsional vibrations of marine propulsion systems. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies*. 2024;1:95-103. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2024-1-95-103>. EDN MEPTMY.

### Введение

Микроэлектромеханические акселерометры (МЭМС-акселерометры) являются устройствами, которые используются для измерения ускорения и нашли широкое применение в различных отраслях промышленности и техники, включая автомобильную, авиационную и космическую отрасли, а также медицинские изделия и устройства контроля и навигации [1, 2]. Применение МЭМС-акселерометров позволяет упростить производство приборов для контроля параметров опасных вибраций и колебаний, возникающих при работе механизмов, в том числе и крутильных колебаний [3–5]. Крутильные колебания являются опасными явлениями, которые могут привести к усталостным разрушениям судовых коленчатых промежуточных и гребных валов, особенно при резонансе свободных и вынужденных колебаний. Многие специалисты считают, что при всей изученности проблемы крутильных колебаний необходимо повышать уровень эффективности их диагностики и расчетов. Одним из направлений снижения аварий элементов судовых машинно-двигательных комплексов (МДК) является совершенствование измерительных систем.

Сравнение методов измерений крутильных колебаний в энергетических установках приводится в работах [6, 7], в том числе в них указаны основные достоинства и недостатки применения акселерометров для решения подобных задач. Вместе с тем в настоящее время отечественной фирмой Zetlab предлагается измерительная система на базе акселерометров и осуществляется ее практическое применение [8]. Однако в перечисленных выше работах не рассматривается такой важный аспект для акселерометров, как их некорректная работа при перегрузках. Фактически в настоящее время

отсутствует сравнительный анализ характеристик наиболее распространенных датчиков акселерометров и экспериментальная проверка акселерометров различных типов при измерении крутильных колебаний в реальных судовых МДК. В настоящей статье предлагается устранить данный пробел при помощи проведенных авторских теоретических и практических исследований, что является научной и практической новизной работы.

### Общие сведения о применяемых в современной технике акселерометрах

Среди большого количества акселерометров можно выделить следующие модели, которые применяются в системах измерения, мониторинга и диагностики: ADXL345, ADXL375 и H3LIS331DL, каждый из них имеет свои уникальные характеристики и преимущества. Кратко сравним технические характеристики моделей акселерометров с выделением их конструктивных и функциональных особенностей. При анализе необходимо учесть, что для зарубежных моделей уровень ускорения часто указывается в единицах измерения, пропорциональных ускорению свободного падения  $g$ , равному  $9,81 \text{ м/с}^2$ .

Сравнительные технические характеристики акселерометров приведены в табл. 1.

Однако значения чувствительности и точности измерений могут варьироваться от температуры. Согласно табл. 1 наибольшим диапазоном измерения обладает модель H3LIS331DL, но при этом точность измерений уступает моделям от компании AnalogDevices. Характерной особенностью МЭМС-акселерометров является отключение по защите при перегрузке, т. е. при превышении наибольшей границы диапазона измерений.

Таблица 1

Table 1

**Сравнительные технические характеристики акселерометров**

**Comparative technical characteristics of accelerometers**

Модель	Фирма-производитель	Страна-производитель	Максимальный диапазон измерений $g$ , $m/c^2$	Чувствительность $LSB / g$	Точность измерений, $m/c^2$
ADXL345	AnalogDevices	США	$\pm 16$ (157)	3,9 (0,038)	0,98
ADXL375	AnalogDevices	США	$\pm 200$ (1 962)	10 (0,098)	0,98
H3LIS331DL	STMicroelectronics	Франция	$\pm 400$ (3 924)	4 (0,039)	4,9–19,6

**Расчет возможности применения акселерометров**

Для вывода формулы для проведения анализа были использованы известные зависимости:

$$a = \frac{V^2}{R},$$

где  $a$  – ускорение на поверхности вращающегося вала,  $m/c^2$ ;  $V$  – линейная скорость на поверхности вала,  $m/c$ ;  $R$  – радиус вала;

$$V = \omega R,$$

где  $\omega$  – угловая скорость,  $рад/c$ ;

$$\omega = \frac{\pi n}{30},$$

где  $n$  – частота вращения,  $мин^{-1}$ .

Для определения границ работоспособности акселерометров был произведен расчет ускорения  $a$ ,  $m/c^2$ , возникающего на внешней поверхности вала с диаметром  $D$ ,  $мм$ , при его частоте вращения  $n$ ,  $мин^{-1}$ , по формуле

$$a = \frac{(\omega R)^2}{R} = \frac{\omega^2 D}{2} = \frac{D \left( \frac{\pi n}{30} \right)^2}{2}. \quad (1)$$

Размер  $D$  варьировался исходя из следующих соображений. В Волго-Каспийском регионе распространены суда преимущественно небольшого водоизмещения и по опыту работы испытательного центра «MTS» ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет» – диаметры валов судов, у которых производятся измерения крутильных колебаний, составляют от 0,08 м (для катера типа РК проекта 376 [9]) до 0,32 м (суда обеспечения буровых платформ типа «Светлый»). Диапазон частоты вращения принимаем от 0 до 1 600  $мин^{-1}$  со ступенчатым ростом по 100  $мин^{-1}$ , верхняя граница, характерная для дизелей серии CAT3512B, которые устанавливаются на ряде морских буксиров. Расчет производился в программе MSExcel, результаты обработки представлены в табл. 2.

Таблица 2

Table 2

**Границы применимости акселерометров различных моделей**

**Limits of applicability of accelerometers of various models**

Модель	Частота вращения, об/мин	Диаметр вала, мм
ADXL345	0–290	0–340
	300	0–300
	400	0–160
	500	0–100
ADXL375	0–1 025	0–340
	1 100	0–280
H3LIS331DL	0–1450	0–340
	1 500	0–80
	1 600	0–260

Таким образом, можно рекомендовать следующий принцип выбора акселерометра исходя из их предельных диапазонов измерения ускорения, ха-

рактеристик точности и чувствительности:  
 – ADXL345 использовать при частотах вращения от 0 до 290  $мин^{-1}$  и диаметре вала от 0 до 340 мм;

– ADXL375 использовать при частотах вращения от 291 до 1 025 мин<sup>-1</sup> и диаметре вала от 0 до 340 мм;

– H3LIS331DL использовать при частотах вращения от 1 026 до 1 450 мин<sup>-1</sup> и диаметре вала от 0 до 340 мм;

– H3LIS331DL использовать при частотах вращения от 1 451 до 1 600 мин<sup>-1</sup> и диаметре вала от 0 до 260 мм.

Полученные формулы и рекомендации позволяют рассчитать пределы по перегрузке моделей акселерометров при любых параметрах диаметра вала и его частоты вращения.

### Экспериментальные измерения крутильных колебаний акселерометрами

Объектом для исследований являлось судно –

буксир проекта 911В – под надзором Российского классификационного общества (РКО). Измерения крутильных колебаний производились после замены главных двигателей с установкой новой модели Weichai WD12C350. В состав МДК буксира проекта 911В входят следующие элементы: дизель-редукторный агрегат, состоящий из двигателя и редуктора, вала-проставки, упругой муфты, опорного подшипника, опорного вала, ручного тормозного устройства, гребного вала, дейдвудного устройства, состоящего из дейдвудной трубы и сальника, винта. Акселерометры последовательно устанавливались в разработанный и запатентованный авторами автономный измерительный блок с авторским программным обеспечением [10, 11]. Автономный блок устанавливался на валу (после дизель-редукторного агрегата) с диаметром 200 мм (рис. 1).



Рис. 1. Установка измерительного блока на валу МДК судна проекта 911В

Fig. 1. Installation of the measuring unit on the shaft of the MPC vessel of project 911B

Измерения производились в соответствии с правилами РКО [12] в диапазоне частоты вращения коленчатого вала главного двигателя от 150 до 950 мин<sup>-1</sup> с последовательным ростом частоты вращения до номинальной и снижением до минимально устойчивой.

Если провести расчет, используя формулу (1), то значение ожидаемой величины ускорения можно представить в виде табл. 3, при этом для удобства значения ускорения были рассчитаны в единицах ускорения свободного падения  $g$ , равного 9,81 м/с<sup>2</sup>.

Таблица 3

Table 3

### Расчетные значения ускорения на поверхности вала МДК судна проекта 911В

#### Calculated acceleration values on the surface of the shaft of the propulsion system of the vessel project 911B

Параметр	Значение									
Частота вращения вала $n$ , мин <sup>-1</sup>	150	200	300	380	500	600	700	800	900	950
Ускорение $a$ , м/с <sup>2</sup>	24,65	43,82	98,60	158,19	273,88	394,38	536,80	701,13	887,36	988,70
Величина $a/g$	2,51	4,47	10,05	16,13	27,92	40,20	54,72	71,47	90,46	100,78

Согласно расчету ожидается, что акселерометр ADXL345 будет работоспособен до 380 мин<sup>-1</sup> и далее

будет автоматически отключаться из-за перегрузки. Акселерометры ADXL375 и H3LIS331DL (по расче-

там) будут работоспособны во всем диапазоне изменения частоты вращения.

### Результаты измерений

Обработка результатов измерений проводилась в программном продукте NI Labview. Замеры производились поминутно на различных частотах вращения. По оси  $X$  представлено время, для стандартизации на рисунках представлен временной диапазон в 1 с (между 32-й и 33-й секундой замеров) на различных частотах вращения вала. По оси  $Y$  представлено ускорение. Для удобства графики смещены относительно среднего значения к оси  $X$ , величина смещения указана в подписях к рисункам,

представленным ниже.

Измерения при помощи акселерометра H3LIS331DL.

В результате анализа полученных результатов измерений ускорений при помощи акселерометра (рис. 2–4) была выявлена достаточно большая погрешность измерений, а также высокий уровень шума сигнала. К недостаткам применения данной модели для измерений ускорения в МДК судна проекта 911В можно отнести низкую чувствительность и в два раза меньшую разрядность аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) по сравнению с двумя другими моделями акселерометров.

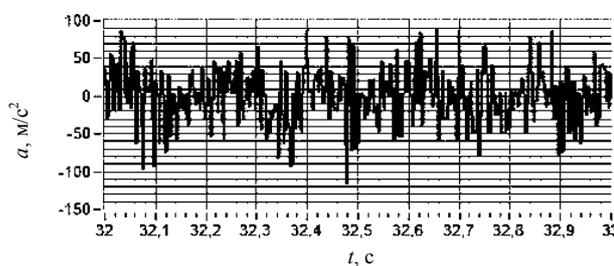


Рис. 2. Результаты измерения ускорения акселерометром H3LIS331DL при частоте вращения  $200 \text{ min}^{-1}$ , смещение  $-41 \text{ m/s}^2$

Fig. 2. Results of acceleration measurement with the accelerometer H3LIS331DL at a rotation speed of  $200 \text{ min}^{-1}$ , displacement  $-41 \text{ m/s}^2$

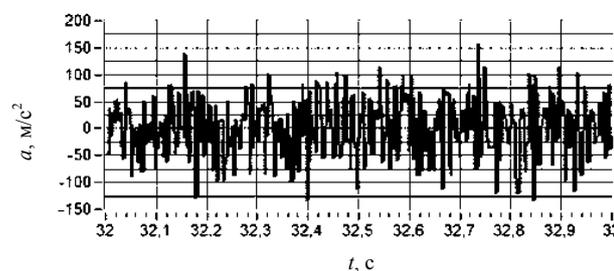


Рис. 3. Результаты измерения ускорения акселерометром H3LIS331DL при частоте вращения  $275 \text{ min}^{-1}$ , смещение  $-80 \text{ m/s}^2$

Fig. 3. Results of acceleration measurement with the H3LIS331DL accelerometer at a rotational speed of  $275 \text{ min}^{-1}$ , displacement  $-80 \text{ m/s}^2$

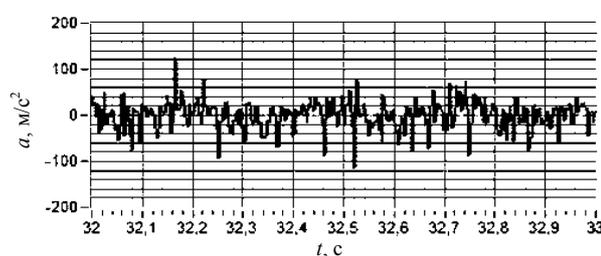


Рис. 4. Результаты измерения ускорения акселерометром H3LIS331DL при частоте вращения  $450 \text{ min}^{-1}$ , смещение  $-232 \text{ m/s}^2$

Fig. 4. Results of acceleration speed measurement with the H3LIS331DL accelerometer at a rotation speed of  $450 \text{ min}^{-1}$ , displacement  $-232 \text{ m/s}^2$

Измерения при помощи акселерометра ADXL345. Исходя из представленных выше расчетных данных, акселерометр ADXL345 сможет работать в диапазоне измерения вибрации  $\pm 16g$  при частоте вращения до  $380 \text{ мин}^{-1}$ . Однако для повышения точности при возникающих небольших ускорениях диапазон измерений при настройке акселерометра был выбран в пределах  $\pm 2g$ . Представленные графики на рис. 5, 6 указывают на перегрузку акселерометра при таких условиях уже на частоте враще-

ния  $133 \text{ мин}^{-1}$ . Экспериментальные результаты соответствуют расчетным данным. На рис. 5 представлены показания акселерометра по оси Z, при смещении  $2g$ , а на рис. 6 представлены показания без смещения по всем трем измерительным осям. Хорошая чувствительность и точность измерений является преимуществом данного акселерометра, однако небольшой диапазон измерений сильно ограничивает его применение.

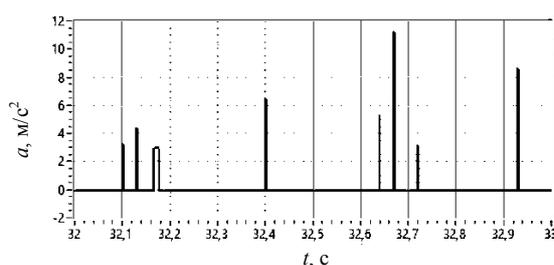


Рис. 5. Результаты измерения ускорения акселерометром ADXL345 (ось Z), смещение  $- 20 \text{ м/с}^2$

Fig. 5. Acceleration measurement results with the ADXL345 accelerometer (Z axis), displacement  $- 20 \text{ м/с}^2$

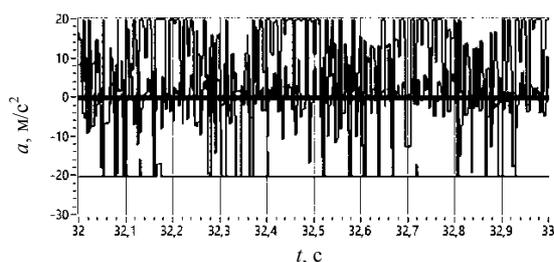


Рис. 6. Результаты измерения ускорения акселерометром ADXL345 по трем измерительным осям, без смещения

Fig. 6. Results of acceleration measurement with the ADXL345 accelerometer along three measuring axes, without displacement

Измерения при помощи акселерометра ADXL375. Данный акселерометр имеет высокую чувствительность и точность измерений в большом диапазоне ускорений, что делает его достаточно универсальным. Относительно невысокая стоимость де-

лает его конкурентоспособным среди прочих предлагаемых решений. Полученные результаты на рис. 7–9 свидетельствуют о работе акселерометра без перегрузок и погрешностей во всем диапазоне частот вращения вала.

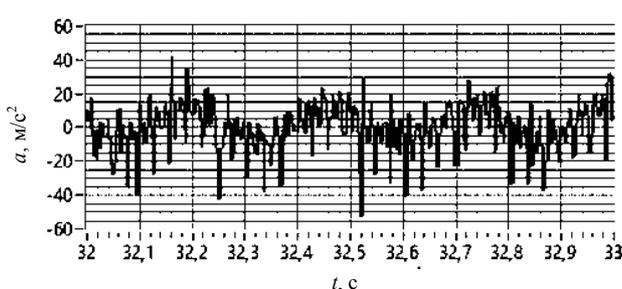


Рис. 7. Результаты измерения ускорения акселерометром ADXL375 при частоте вращения  $200 \text{ мин}^{-1}$ , смещение  $- 45 \text{ м/с}^2$

Fig. 7. Results of acceleration measurement with the ADXL375 accelerometer at a rotation speed of  $200 \text{ мин}^{-1}$ , displacement  $- 45 \text{ м/с}^2$

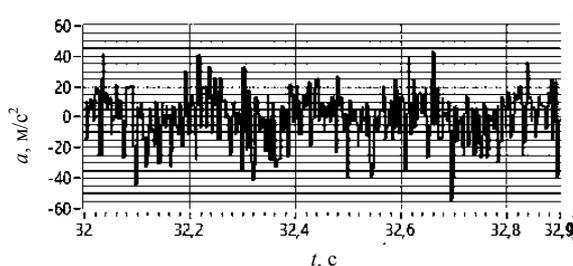


Рис. 8. Результаты измерения ускорения акселерометром ADXL375 при частоте вращения  $275 \text{ мин}^{-1}$ , смещение –  $81 \text{ м/с}^2$

Fig. 8. Results of acceleration measurement with the ADXL375 accelerometer at a rotational speed of  $275 \text{ min}^{-1}$ , displacement –  $81 \text{ m/s}^2$

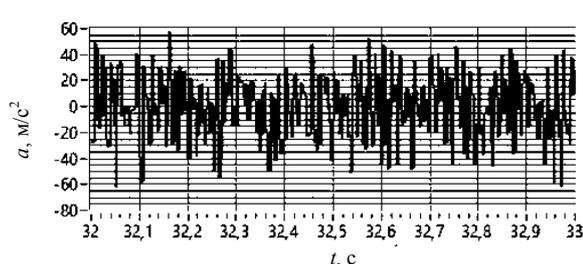


Рис. 9. Результаты измерения ускорения акселерометром ADXL375 при частоте вращения  $450 \text{ мин}^{-1}$ , смещение –  $153 \text{ м/с}^2$

Fig. 9. Results of acceleration measurement with the ADXL375 accelerometer at a rotation speed of  $450 \text{ min}^{-1}$ , displacement –  $153 \text{ m/s}^2$

Необходимо выделить дополнительные преимущества акселерометра модели ADXL375: встроенный фильтр низких частот для уменьшения погрешностей и фильтрации высокочастотных помех; функцию встроенного самотестирования для диагностики устройства; низкое энергопотребление, что позволяет его использовать для длительных измерений в автономных устройствах.

### Выводы

По итогам выполненной работы необходимо сделать следующие выводы:

1. Применение акселерометров возможно не только для измерения вибрации, но и крутильных колебаний, в том числе и в судовых установках. Они имеют ряд преимуществ по сравнению с другими методами измерений – высокая точность и чувствительность, возможность записи первичной калибровки во внутреннюю память МЭМС и др.

2. Наиболее часто в технике применяют акселерометры ADXL345, ADXL375 и H3LIS331DL, которые отличаются своими техническими характеристиками, что определяет области их применения.

3. Наиболее критичными для выбора акселерометров является их чувствительность, точность измерения и порог корректной работы до пере-

грузки. Выбор конкретной модели для измерения крутильных колебаний в судовых МДК может производиться для каждого судна индивидуально, а наличие универсального измерительного блока авторской разработки помогает упростить практическое применение данного метода измерений.

4. Полученные в ходе исследования результаты дают основание рекомендовать акселерометр ADXL375 как базовую модель для большинства судовых МДК с частотами вращения до  $1025 \text{ мин}^{-1}$ .

5. При частотах вращения менее  $135 \text{ мин}^{-1}$  рекомендовано применение акселерометра ADXL345 с диапазоном измерения  $\pm 2g$ , а при настройке диапазона  $\pm 16g$  возможно его применение при частотах вращения до  $380 \text{ мин}^{-1}$ .

6. В случае необходимости измерения крутильных колебаний при частоте вращения более  $1025 \text{ мин}^{-1}$  рекомендовано использование менее точного, но более надежного по порогу отключения от перегрузки акселерометра модели H3LIS331DL.

7. В связи с экономическими санкциями необходимо рассмотреть применение отечественных акселерометров (поиск готовых или изготовление на заказ) и проведение подобного исследования в более широкой номенклатуре изделий.

### Список источников

1. Гуртов В. А., Беляев М. А., Бакшеева А. Г. Микроэлектромеханические системы: учеб. пособие. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2016. 171 с.
2. Калинкина М. Е., Пирожникова О. И., Ткалич В. Л., Комарова А. В. Микроэлектромеханические системы и датчики. СПб.: Изд-во Ун-та ИТМО, 2020. 75 с.
3. Дьяченко А. В., Кокуев А. Г. ICCT-2022. Применение микроэлектромеханических акселерометров в системах управления и диагностирования вибраций и колебаний. URL: <https://uconfy.com/papers/1301/> (дата обращения: 01.11.2023).
4. Лапин Ю. А., Грибиниченко М. В., Портнова О. С., Андриюхина П. А. Метод измерения крутильных колебаний судовых валопроводов при помощи трехосевого акселерометра // Вестн. Инженер. шк. Дальневосточ. федерал. ун-та. 2023. № 3 (56). С. 35–45.
5. Germanovich K., Metreveli Yu. Torsional Vibration Monitoring Using MEMS Accelerometers // Applications in Electronics and Computing Systems. 2022. P. 20–29.
6. Горбачев М. М., Кольванов В. В. Выбор методов постоянного мониторинга крутильных колебаний в судовых машинно-двигательных комплексах // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2023. № 2. С. 54–65.
7. Torsional vibrations in steam turbine shaft trains // Report 2018: 522, Energiforsk, 2018. 62 p.
8. ZetLAB. Система измерения крутильных колебаний. URL: <https://zetlab.com/shop/sistemy-pod-kluch/avtomatizirovannye-stendy/sistema-izmereniya-krutilynih-kolebaniy/> (дата обращения: 15.11.2023).
9. Покусаев М. Н., Мамонтов В. А., Рубан А. Р., Горбачев М. М., Ковалев О. П. Исследование крутильных колебаний машинно-двигательного комплекса разездного речного судна «РК-2091» проекта 376 // Мор. интелтуал. технологии. 2019. № 1-4 (43). С. 88–92.
10. Пат. 2789297 С1 Рос. Федерация, МПК G01H 1/10. Торсиограф / Дьяченко А. В., Конищев Д. Г. № 2022103920; заявл. 15.02.2022; опубли. 01.02.2023.
11. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023617934, Рос. Федерация. RotateAnalyzer / Дьяченко А. В., Базикалов И. В., Конищев Д. Г. № 2023615750; заявл. 22.03.2023; опубли. 17.04.2023.
12. Правила классификации и постройки судов (ПКПС). М.: РКО, 2019. 1685 с.

### References

1. Gurtov V. A., Beliaev M. A., Baksheeva A. G. *Mikroelektromekhanicheskie sistemy: uchebnoe posobie* [Microelectromechanical systems: a textbook]. Petrozavodsk, Izd-vo PetrGU, 2016. 171 p.
2. Kalinkina M. E., Pirozhnikova O. I., Tklich V. L., Komarova A. V. *Mikroelektromekhanicheskie sistemy i datchiki* [Microelectromechanical systems and sensors]. Saint-Petersburg, Izd-vo Un-ta ITMO, 2020. 75 p.
3. D'iachenko A. V., Kokuev A. G. *ICCT-2022. Primenenie mikroelektromekhanicheskikh akselerometrov v sistemakh upravleniia i diagnostirovaniia vibratsii i kolebaniia* [Microelectromechanical systems and sensors]. Available at: <https://uconfy.com/papers/1301/> (accessed: 01.11.2023).
4. Lapin Iu. A., Gribinichenko M. V., Portnova O. S., Andriukhina P. A. Metod izmereniia krut'il'nykh kolebaniia sudovykh valoprovodov pri pomoshchi trekhosevogo akselerometra [A method for measuring torsional vibrations of ship's shaft lines using a three-axis accelerometer]. *Vestnik Inzhenernoii shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta*, 2023, no. 3 (56), pp. 35-45.
5. Germanovich K., Metreveli Yu. Torsional Vibration Monitoring Using MEMS Accelerometers. *Applications in Electronics and Computing Systems*, 2022, pp. 20-29.
6. Gorbachev M. M., Kolyvanov V. V. Vybor metodov postoiannogo monitoringa krut'il'nykh kolebaniia v sudovykh mashinno-dvizhite'l'nykh kompleksakh [Selection of methods for continuous monitoring of torsional vibrations in marine propulsion systems]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Serii: Morskaiia tekhnika i tekhnologiia*, 2023, no. 2, pp. 54-65.
7. Torsional vibrations in steam turbine shaft trains. *Report 2018: 522, Energiforsk*, 2018. 62 p.
8. ZetLAB. *Sistema izmereniia krut'il'nykh kolebaniia* [Torsional vibration measurement system]. Available at: <https://zetlab.com/shop/sistemy-pod-kluch/avtomatizirovannye-stendy/sistema-izmereniya-krutilynih-kolebaniy/> (accessed: 15.11.2023).
9. Pokusaev M. N., Mamontov V. A., Ruban A. R., Gorbachev M. M., Kovalev O. P. Issledovanie kru-til'nykh kolebaniia mashinno-dvizhite'l'nogo kompleksa raz'ezdno go rechnogo sudna «RK-2091» proekta 376 [Investigation of torsional vibrations of the engine-propulsion complex of the traveling river vessel “RK-2091” of project 376]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2019, no. 1-4 (43), pp. 88-92.
10. D'iachenko A. V., Konishev D. G. *Torsiograf* [Torsiograph]. Patent RF, no. 2022103920, 01.02.2023.
11. D'iachenko A. V., Bazikalov I. V., Konishev D. G. *RotateAnalyzer*. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlia EVM no. 2023617934, RF, 17.04.2023.
12. *Pravila klassifikatsii i postroiki sudov (PKPS)* [Rules for the Classification and Construction of Ships (SCPS)]. Moscow, RKO, 2019. 1685 p.

Статья поступила в редакцию 16.11.2023; одобрена после рецензирования 01.02.2024; принята к публикации 06.02.2024  
The article was submitted 16.11.2023; approved after reviewing 01.02.2024; accepted for publication 06.02.2024

**Информация об авторах / Information about the authors**

**Максим Михайлович Горбачев** – кандидат технических наук; доцент кафедры эксплуатации водного транспорта и промышленного рыболовства; Астраханский государственный технический университет; max9999\_9@mail.ru

**Артем Владиславович Дьяченко** – аспирант кафедры автоматизации и управления; Астраханский государственный технический университет; sadwyn1997@gmail.com

**Дмитрий Георгиевич Конищев** – начальник электро-монтажного цеха; ООО «Р Шиппинг»; dima\_31@mail.ru

**Андрей Геннадьевич Кокуев** – кандидат технических наук, доцент; заведующий кафедрой автоматизации и управления; Астраханский государственный технический университет; kokuevag@mail.ru

**Maksim M. Gorbachev** – Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Operation of Water Transport and Industrial Fishing; Astrakhan State Technical University; max9999\_9@mail.ru

**Artem V. Diachenko** – Postgraduate Student of the Department of Automation and Control; Astrakhan State Technical University; sadwyn1997@gmail.com

**Dmitry G. Konishchev** – Head of the Electrical Installation Shop; LLC R Shipping; dima\_31@mail.ru

**Andrey G. Kokuev** – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Head of the Department of Automation and Control; Astrakhan State Technical University; kokuevag@mail.ru

