



DOI: 10.24937/2542-2324-2021-4-398-61-67
УДК 629.5.018.15+620.172.216

И.А. Соловьев , А.А. Ермолаев 
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

ИЗМЕРЕНИЕ В КАВИТАЦИОННЫХ ТРУБАХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СИЛ НА МОДЕЛИ ГРЕБНОГО ВИНТА

Объект и цель научной работы. Объектом исследования является динамометр продольных нестационарных сил для проведения модельных испытаний в кавитационных трубах. Цель работы – улучшение метрологических характеристик динамометра и расширение сферы его применения.

Материалы и методы. Используются метрологические характеристики динамометров и результаты модельных экспериментов в большой кавитационной трубе (БКТ).

Основные результаты. Разработан, изготовлен, аттестован и введен в эксплуатацию динамометр продольных нестационарных сил на основе пьезоэлектрического датчика силы с улучшенными метрологическими характеристиками, что позволит его использовать при проведении испытаний не только моделей гребных винтов (ГВ), но и других типов движителей.

Заключение. Использование динамометра на основе пьезоэлектрического датчика силы повышает точность определения нестационарных сил, увеличивает диапазон измеряемых частот, расширяет возможности его применения и улучшает помехозащищенность динамометра.

Ключевые слова: нестационарные силы, гребной винт, динамометр.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2021-4-398-61-67
UDC 629.5.018.15+620.172.216

I. Solovyev , A. Yermolayev 
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

UNSTEADY FORCE MEASUREMENTS ON PROPELLER MODEL IN CAVITATION TUNNELS

Object and purpose of research. This paper discusses longitudinal unsteady force dynamometer for cavitation tunnel tests. The purpose of the study is to improve metrological performance of the dynamometer and extend the scope of its application.

Materials and methods. The study is based on metrological parameters of dynamometers and model test data available with KSRC Large Cavitation Tunnel (LCT).

Main results. Development, manufacturing, certification and commissioning of longitudinal unsteady force dynamometer based on piezoceramic load cell with improved metrological performance making it applicable for model testing of not only propellers but also other types of marine propulsors.

Conclusion. Dynamometer with piezoceramic load cell offers more accurate measurement of unsteady forces, wider band of measurement frequencies, as well as wider spectrum of possible applications and lower susceptibility to interference.

Key words: unsteady forces, propeller, dynamometer.

The authors declare no conflicts of interest.

Для цитирования: Соловьев И.А., Ермолаев А.А. Измерение в кавитационных трубах нестационарных сил на модели гребного винта. Труды Крыловского государственного научного центра. 2021; 4(398): 61–67.

For citations: Solovyev I., Yermolayev A. Unsteady force measurements on propeller model in cavitation tunnels. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2021; 4(398): 61–67 (in Russian).

Введение

Introduction

В установившемся режиме движения надводной и подводной морской техники при работе ГВ в неоднородном потоке на его лопастях возникают гидродинамические нестационарные периодические и аperiodические силы. Нестационарные силы вызывают дискретное акустическое излучение, которое является одним из видов шумоизлучения ГВ. Основной вклад в шумоизлучение данного вида в современных ГВ вносит первая гармоника продольной составляющей лопастной частоты. Частота первой гармоники периодических сил на каждой лопасти равна частоте вращения вала ГВ, а суммарные гидродинамические силы имеют частоты, равные лопастной частоте, определяемой по формуле

$$f = n \cdot Z,$$

где n – частота вращения модели ГВ; Z – число лопастей модели ГВ.

Модельные испытания в БКТ по определению нестационарных сил проводят при частоте вращения вала от 10 до 40 об/с, поэтому частотный диапазон для измерения первой гармоники нестационарных сил, например, для семилопастного винта, будет лежать в пределах от 70 до 280 Гц. Акустические модельные испытания в БКТ с целью прогнозирования шумоизлучения ГВ на столь низких частотах невозможны в связи с существующими ограничениями частотного диапазона измерений снизу, определяе-

мыми габаритами кавитационных труб. Поэтому в настоящее время прогнозирование дискретных составляющих шумоизлучения производится на основе измерения нестационарных сил динамометрическим методом. Результаты измерения пересчитываются в безразмерные величины по формуле

$$\bar{F} = F / (\rho n^2 D^4),$$

где \bar{F} – нормированное значение нестационарной силы на ГВ; F – нестационарная сила на ГВ; D – диаметр модели ГВ; ρ – плотность воды.

От точности результатов измерения нестационарных сил, действующих на модель ГВ, напрямую зависит прогноз шумоизлучения натурного ГВ.

Теоретическими и практическими работами по определению нестационарных сил на моделях ГВ в БКТ длительное время занимались Б.А. Бискуп, Ю.Л. Левковский, А.С. Горшков, А.В. Чалов и другие сотрудники Крыловского центра, и именно на полученных ими результатах исследований проводятся испытания в настоящее время.

Первые практические работы по измерению продольной составляющей нестационарной силы были проведены в БКТ в середине 1980-х гг. В корпус подводной модели был установлен электродвигатель привода модели винта. Модель ГВ устанавливалась непосредственно на вал динамометра. Измерительная часть динамометра работала на принципе преобразования силы упора в частоту электрического сигнала. Обработка сигнала представляла собой достаточно сложный по тем временам процесс преобразования частотного сигнала в ана-

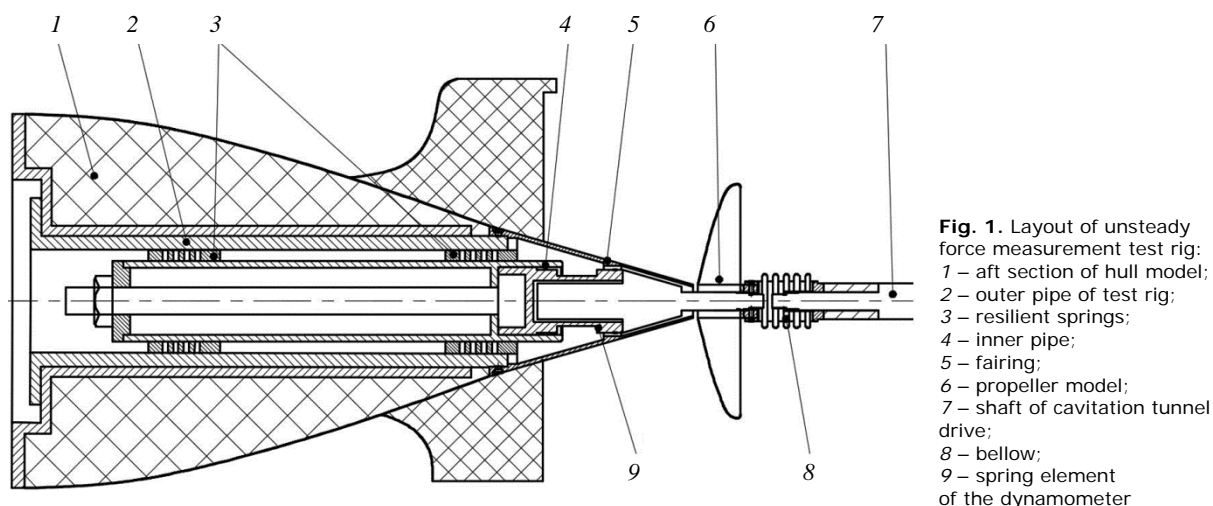


Fig. 1. Layout of unsteady force measurement test rig:
 1 – aft section of hull model;
 2 – outer pipe of test rig;
 3 – resilient springs;
 4 – inner pipe;
 5 – fairing;
 6 – propeller model;
 7 – shaft of cavitation tunnel drive;
 8 – bellows;
 9 – spring element of the dynamometer

Рис. 1. Схема установки для измерения нестационарных сил: 1 – кормовая секция модели корпуса; 2 – наружная труба установки; 3 – амортизационные пружины; 4 – внутренняя труба; 5 – обтекатель; 6 – модель гребного винта; 7 – вал привода кавитационной трубы; 8 – сильфон; 9 – пружинный элемент динамометра

логовый во вращающейся системе координат. Для уменьшения собственного уровня шума динамометра применялся бесконтактный токосъемник на ферритовых сердечниках. Для уменьшения собственного шума и вибраций модели при заказе электродвигателя выставлялись жесткие требования к его шуму и вибрациям, а в конструкции привода применялись подшипники скольжения.

Проведенные испытания показали, что полноценные измерения нестационарных сил в данной конструкции провести невозможно, в основном из-за высокого уровня вибраций, передаваемых от привода вала модели винта на динамометр. Измерительная система тоже нуждалась в доработке.

В начале 1990-х гг. был реализован новый подход к измерению нестационарных сил в БКТ. Привод вала модели винта (рис. 1) осуществлялся от штатного привода БКТ через сильфонный узел, который снижает уровень вибраций, передаваемых от привода модели винта на динамометр, устраняет несоосность валов динамометра и привода. Основание динамометра устанавливалось в специальную трубу, которая крепилась к модели с помощью амортизационных пружин, в результате чего динамометр оказывался подвешенным на них и был развязан от корпуса модели. Основной частью динамометра являлся пружинный элемент с наклеенными на него тензорезисторами.

Схема проведения измерений (рис. 2) и разработанная методика проведения испытаний используются и в настоящее время. Модель ГВ устанавливалась на вал динамометра, усилия от динамометра передавались через подшипниковый узел скольжения на неподвижный пружинный элемент с наклеенными на него тензорезисторами.

Анализ конструкции и характеристик динамометров нестационарных сил

Design and performance analysis of unsteady force dynamometers

Пружинный элемент динамометра тензометрического динамометра должен работать в дорезонансной области, и основным параметром для расчета пружинного элемента является диапазон измеряемых частот (верхняя частота).

Для получения максимальной чувствительности динамометра необходимо уменьшать площадь сечения пружинного тензометрического элемента (в пределах, допускающих только упругие деформации в необходимом диапазоне измерений).

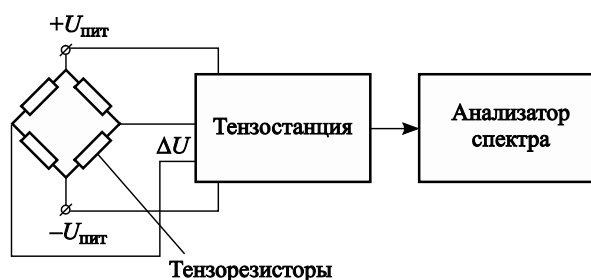


Рис. 2. Схема измерительного канала для определения динамических значений упора на основе тензометрического метода

Fig. 2. Strain gauging tract for dynamic thrust measurements

В тоже время для получения линейной амплитудно-частотной характеристики динамометра (в заданном частотном диапазоне) необходимо, чтобы частота собственных колебаний пружинного элемента динамометра, нагруженного массой вала и массой модели винта с учетом присоединенной массы воды превосходила максимальную рабочую частоту не менее чем в 2 раза.

Исходя из этих критериев, собственная частота динамометра при измерениях первой гармоники лопастной частоты семилопастной модели ГВ должна быть выше значения $f_{\min} \geq 280 \cdot 2 = 560$ Гц.

Собственная частота линейной упругой системы определяется по формуле

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}},$$

где k – коэффициент жесткости; m – масса динамометрической системы (учитывается масса всех элементов, «подвешенных» на пружине, включая присоединенную массу воды).

Для соблюдения условия $f_{\min} \geq 560$ Гц с целью уменьшения массы динамометра в конструкции вала и пружины динамометра применяются легкосплавные материалы, массу модели ГВ также минимизируют.

Несмотря на принимаемые меры, жесткость измерительной пружины для данного типа динамометров получается не менее чем в 5 раз бóльшая, чем было бы необходимо для изготовления динамометра статических сил.

При этом нестационарные силы, измеряемые на моделях ГВ, при работе на докавитационных режимах работы составляют величину менее 1 % упора и для моделей ГВ с диаметром 200–250 мм,

применяемых в БКТ, измеряемые значения продольной нестационарной силы, лежат в диапазоне от 0,5 Н до 10 Н. Поэтому чувствительность динамометра получается очень малой, а уровень собственных шумов, приведенных к входу, достаточно большой. При проведении испытаний с моделями ГВ большого диаметра необходимо изготавливать новый динамометр с более жесткой пружиной, что влечет за собой увеличение значения минимально измеряемых сил и уменьшения верхней границы частотного диапазона до приемлемого уровня. Поэтому в настоящее время используется только один динамометр для моделей винтов до 250 мм.

Применение пружины в качестве основы измерительного элемента вне зависимости от способа преобразования деформации в выходной сигнал (тензорезисторный, частотный, оптический и др.) накладывает ограничения по частотному диапазону сверху, чувствительности и предельным нагрузкам, которые не позволяют использовать такие динамометры при измерениях нестационарных сил в многолопастных движительных комплексах.

Также большим недостатком тензометрических динамометров, в силу распределенного положения тензометров, является большая зависимость от внешних помех. При использовании штатного привода модели винта в БКТ наводимые на динамометр помехи имеют частоты кратные 50 Гц, значения которых не меняются по частоте от режима к режиму. В современных установках в качестве привода вала модели винта применяются частотные принципы управления скоростью вращения электродвигателя. При использовании приводов с частотным принципом

управления оборотами наводимые на динамометр помехи имеют частоты кратные вальной частоте модели винта, причем кратность (номер гармоники первой вальной частоты) зависит от схемы управления приводом.

На рис. 3 в качестве примера приведен спектр на выходе тензометрического динамометра «Б-1к» (уровень собственных шумов) при работающем, но не нагруженном приводе вала модели винта установки Cussons Technology. Тензометрический и пьезоэлектрический динамометры были установлены рядом с работающим приводом установки. Из рисунка видно, что третья, пятая, шестая, девятая и одиннадцатая гармоники вальной частоты (37 Гц) выделяются в спектре в явном виде, и величины наводок на данных частотах соизмеримы с измеряемыми значениями нестационарной силы и составляют от 0,3 Н до 6 Н. Это означает, что проведение измерений нестационарных сил на двигателях с количеством лопастей 5, 6, 9, 11 невозможно при использовании данного типа привода. Вполне вероятно, что при применении других типов частотных приводов вала модели в спектре тензометрического динамометра появятся помехи с другими номерами гармоник вальной частоты.

Пружинные измерительные элементы тензометрических динамометров, имеющие достаточно сложную конфигурацию, изготавливались в единичном экземпляре в 22-й лаборатории, наклейка тензометров осуществлялась тоже собственными силами. Применение пьезоэлектрических датчиков силы, изготавливаемых серийно российской промышленностью, позволит уменьшить трудозатраты, увеличить надежность работы динамо-

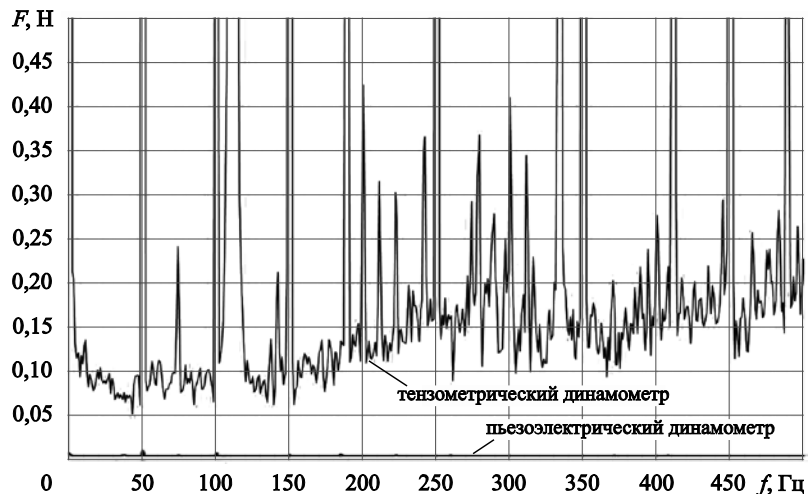


Рис. 3. Уровень собственных шумов динамометров при работающем частотном приводе вала модели винта

Fig. 3. Self-noise level of dynamometers with operating frequency-based drive of propeller shaft

Fig. 4. Unsteady force dynamometer:
1 – load cell;
2 – key;
3 – propeller model shaft;
4 – threaded opening for dynamometer fastening;
5 – dynamometer body;
6 – bearing

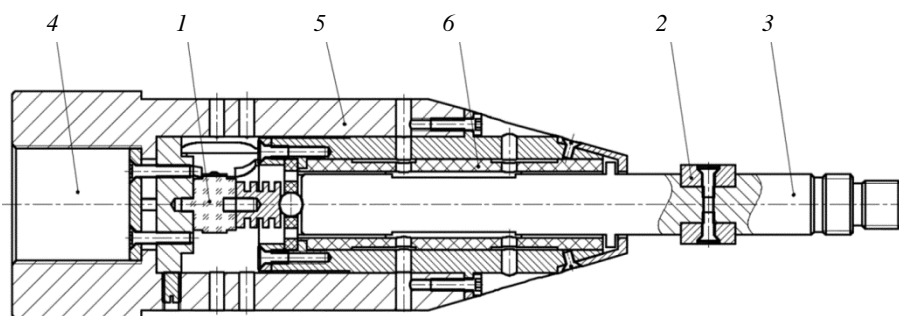


Рис. 4. Динамометр для измерения нестационарных сил:
1 – датчик силы; 2 – шпонка; 3 – вал модели гребного винта; 4 – резьбовое отверстие для крепления динамометра; 5 – корпус динамометра; 6 – подшипник

метра, повысить повторяемость характеристик динамометров.

В целом, основным недостатком применяемых тензометрических динамометров является то, что измерительная пружина динамометра является несущей конструкцией (с «подвешенными» на нее массами модели винта, подшипникового узла и вала), на которую передаются все силы, действующие на модель ГВ. В реализованной конструкции динамометра на датчик силы передается только сила упора модели винта, причем запас по нагрузкам достаточно большой и составляет 5000 Н. Источником сигнала в датчике силы является жесткий пьезоэлемент.

Для устранения недостатков тензометрических динамометров был разработан, изготовлен, аттестован и введен в эксплуатацию динамометр продольных нестационарных сил на основе пьезоэлектрического датчика силы (рис. 4).

В данной конструкции вал модели винта 1 передает усилия непосредственно на датчик силы 2 серийного производства в герметичном корпусе. Серийные датчики силы имеют сертифицированные метрологические характеристики, ориентироваться на которые можно при проектировании и калибровке динамометра.

Применение пьезоэлектрического датчика значительно расширяет частотный диапазон измерения (зависит от типа применяемого датчика и составляет не менее 2000 Гц). Это позволит проводить полноценные испытания моделей движителей различных типов с практически любым количеством лопастей и измерять не только первую, но и более высшие гармоники лопастной частоты. Датчик силы, применяемый в данной конструкции, имеет собственную частоту 20 кГц, что с запасом перекрывает необходимый частотный диа-

пазон. Предельное значение измеряемой силы датчика силы составляет 5000 Н, что позволяет использовать его для проведения испытаний движителей с диаметром до 320 мм, т.е. динамометр имеет более широкий диапазон применения без ухудшения точностных характеристик измерения.

Требования к уменьшению массы модели винта будут устанавливаться только исходя из возможностей подшипника скольжения динамометра. Для повышения помехозащищенности динамометра от наводок, вызванных работой энергоемкого оборудования кавитационных труб, необходимо применять датчики силы со встроенными усилителями, использующие в работе технологию ИЕРЕ (Integrated Electronic Piezoelectric). Датчики силы, изготовленные по данной технологии, являются относительно низкоомным источником переменного напряжения сигнала, его сопротивление составляет около 100 Ом.

На рис. 3 также приведен спектр на выходе пьезоэлектрического динамометра (уровень собственных шумов) при работающем, но не нагруженном приводе вала модели винта установки Cussons Technology. Из графика видно, что уровень собственных шумов нового динамометра значительно ниже, чем у тензометрического динамометра, что позволяет применить его в установках с частотным приводом.

Изготовление новых динамометров будет более технологичным и менее трудозатратным, т.к. не придется производить расчет пружинного элемента и его изготовление, наклейку, распайку и герметизацию тензорезисторов.

В изготовленном динамометре из-за габаритных ограничений применен датчик силы с зарядовым выходом, при этом миниатюрный усилитель

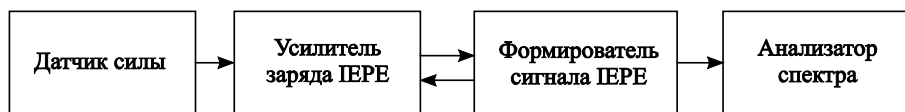


Рис. 5. Схема измерительного канала динамометра с пьезоэлектрическим датчиком силы
Fig. 5. Measurement tract of dynamometer with piezoelectric load cell

заряда, изготовленный по технологии ПЭРЕ, установлен в корпус динамометра.

Схема измерительного канала на основе динамометра с пьезоэлектрическим датчиком силы для определения динамических значений упора представлена на рис. 5.

Нестационарная сила, действующая на вал динамометра, вызывает переменную деформацию чувствительного элемента измерительного модуля. В результате на выходе измерительного модуля возникает электрический заряд, пропорциональный воздействующей силе. Электриче-

ский заряд поступает на усилитель заряда, формирующий выходной сигнал ПЭРЕ. Выходной сигнал поступает на формирователь сигнала, который запитывает усилитель заряда постоянным током и вырабатывает на выходе напряжение, пропорциональное нестационарной силе, действующей на вал динамометра. Выходное напряжение поступает на анализатор спектра для дальнейшей обработки.

Недостатком пьезоэлектрического динамометра является отсутствие постоянной составляющей в выходном сигнале, поэтому статическую

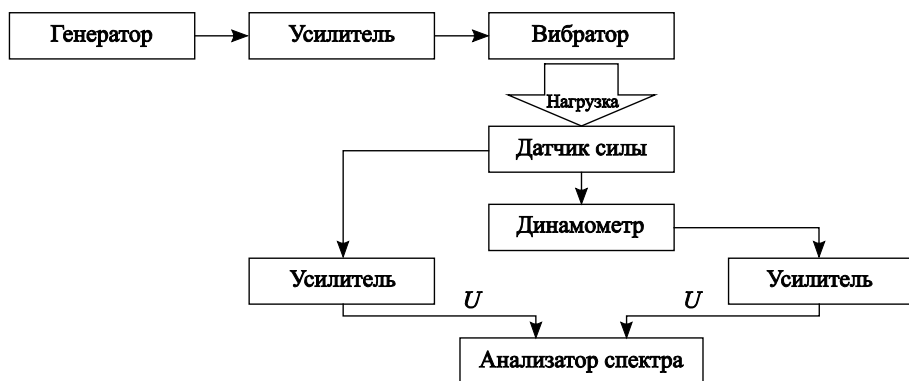


Рис. 6. Схема калибровки пьезоэлектрического динамометра (U – напряжение сигнала на выходе усилителей динамометра и датчика силы)

Fig. 6. Calibration layout for piezoelectric dynamometer (U – signal voltage at amplifier output)

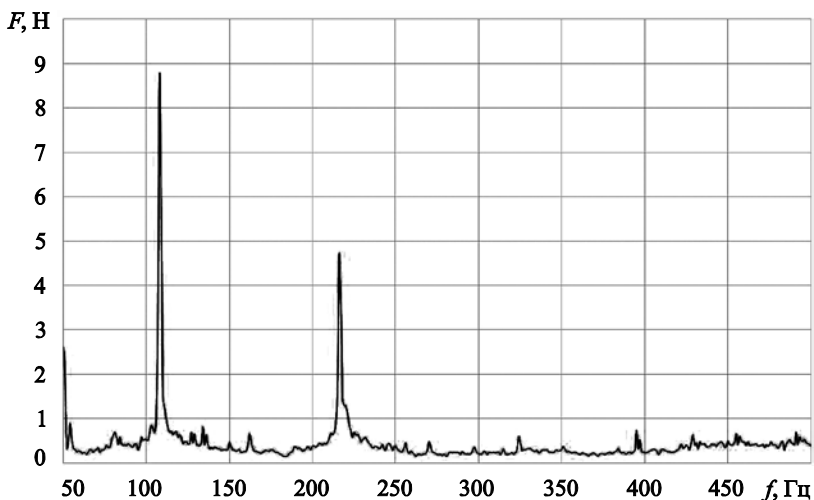


Рис. 7. Спектр продольной составляющей нестационарной силы на четырехлопастной модели гребного винта при $n = 27$ об/с

Fig. 7. Spectrum of longitudinal component in the unsteady force acting on four-bladed propeller model at rotation speed $n = 27$ rps

калибровку данных динамометров произвести невозможно. Калибровку пьезоэлектрических динамометров необходимо проводить в динамике, используя, например, в качестве образцового датчик силы 209C02 с пределом измерения сил 9,8 Н, относительной нелинейностью градуировочной характеристики не более 1,0 % и диапазоном частот от 0,05 Гц до 30 кГц. Источником переменной силы, прикладываемой через образцовый датчик к динамометру, служит вибратор. Схема калибровки пьезоэлектрического динамометра приведена на рис. 6.

Перед началом тестовых испытаний нового динамометра в БКТ была проведена модернизация привода вала модели винта, которая позволила снизить бой вала до 0,2 мм.

Новый динамометр был испытан в БКТ с двумя семилопастными и одним четырехлопастным винтами и показал хорошие результаты. Спектр выходного сигнала динамометра при работе с моделью четырехлопастного винта представлен на рис. 7.

Заключение

Conclusion

Проведенные работы показали преимущества нового динамометра. Применение его позволит расширить номенклатуру проводимых испытаний, в частности провести измерение нестационарных сил динамометрическим методом на многолопастных движительных комплексах, таких, например, как гребной винт в насадке с направляющим аппаратом в расширенном диапазоне частот для анализа периодических нестационарных сил. Увеличение диапазона измеряемых частот позволяет измерять не только первую гармонику лопастной частоты, но и ее более высокие гармоники. Полученные результаты позволяют начать работы по конструированию и изготовлению динамометра для измерения вертикальной и боковой составляющих нестационарных сил на основе пьезоэлектрических датчиков силы.

Список использованной литературы

1. *Левковский Ю.Л.* Шум гребных винтов. Санкт-Петербург: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2005. 182, [1] с.
2. *Бендат Д.С., Пирсол А.* Прикладной анализ случайных данных. Москва: Мир, 1989. 540 с.
3. *Тензометрия в машиностроении: Справ. пособие / [Р.А. Макаров и др.].* Москва: Машиностроение, 1975. 287 с.

References

1. *Yu. Levkovsky.* Propeller noise. St. Petersburg, Krylov State Research Centre, 2005. 182 [1] p. (*in Russian*).
2. *J.S. Bendat, A.G. Piersol.* Random Data: Analysis and Measurement Procedures. Moscow: Mir, 1989. 540 p. (*in Russian*).
3. *R. Makarov et al.* Strain gauging in engineering. Reference book. Moscow: Mashinostroyeniye, 1975. 287 p. (*in Russian*).

Сведения об авторах

Соловьев Игорь Арнольдович, начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 748-63-76. E-mail: igorsoloviev@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0001-6065-387X>.

Ермолаев Андрей Александрович, начальник стенда ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-47-89. E-mail: ermandalex@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0001-7786-6556>.

About the authors

Igor A. Solovyev, Head of Sector, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 748-63-76. E-mail: igorsoloviev@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0001-6065-387X>.

Andrey A. Yermolayev, Test Rig Manager, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-47-89. E-mail: ermandalex@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0001-7786-6556>.

Поступила / Received: 13.09.21
Принята в печать / Accepted: 28.10.21
© Соловьев И.А., Ермолаев А.А., 2021