



**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАБОТЫ
СКОРОСТНОГО СКВАЖИННОГО ДЕБАЛАНСНОГО ВИБРОИСТОЧНИКА**

А. В. Савченко, А. В. Козлов, Д. С. Евстигнеев, М. Н. Цупов

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: sav@eml.ru,
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

На испытательном стенде в лабораторных условиях исследована динамика работы скоростного скважинного сейсмоисточника дебалансного типа. Внутренняя камера виброисточника заполнялась жидкостью и находящийся в ней дебаланс раскручивался электроприводом с частотой вращения от 10 до 50 Гц и шагом 5 Гц. Приведено сравнение амплитуд колебаний генерируемых виброисточником при сухой и заполненной жидкостью внутренней камере.

Источник дебалансного типа, вращение в жидкости, нефть

**INVESTIGATION INTO OPERATING DYNAMICS
OF A HIGH-SPEED BOREHOLE UNBALANCED VIBRATION SOURCE**

A. V. Savchenko, A. D. Kozlov, D. S. Evstigneev, and M. N. Tsupov

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: sav@eml.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

The operating dynamics of a high-speed borehole seismic source of unbalanced type was studied on a test bench in laboratory conditions. The inner chamber of a vibration source was filled with liquid and the unbalance in it was spun by an electric drive with a rotation frequency from 10 to 50 Hz and a step of 5 Hz. A comparison of vibration amplitudes generated by a vibration source with a dry and a liquid-filled inner chamber is made.

Unbalanced source, rotation in fluid, oil

В России большинство крупных месторождений вступило в позднюю стадию разработки, обводненность скважин у них превышает 80 %. Вновь вводимые месторождения со сложным геологическим строением, низкой проницаемостью, повышенной вязкостью нефти относятся к категории трудноизвлекаемых и их доля в общих разрабатываемых запасах страны составляет более 60 % [1, 2].

Одним из методов увеличения нефтеотдачи продуктивных пластов является виброволновой. Он основан на воздействии упругими колебаниями на нефтенасыщенный скелет породы, способствуя его очистке и стимулируя приток нефти к скважине [3 – 11]. Метод экологически чистый. Его основным достоинством является щадящее воздействие на пласт. В отличие от гидроразрыва или кислотной обработки пласта установка виброисточников в скважине не повреждает ее. Вибровоздействие на продуктивный пласт ускоряет процессы растворения, активизирует дегазацию нефти, способствуя ее разжижению и поэтому должно применяться в сочетании с другими методами увеличения нефтеотдачи: химическими, тепловыми, гидродинамическими и микробиологическими [12 – 17]. Разрабатываемые в Институте горного дела СО РАН

погружные виброисточники дебалансного типа могут работать в скважинах как с вязкими, так и с высоковязкими нефтями, эксплуатироваться в агрессивных средах с содержанием механических примесей. В зависимости от конструкции виброисточника его внутренняя камера, в которой вращается дебаланс, может быть герметичной или заполненной жидкостью и даже имеется возможность осуществить прокачку через нее добываемого флюида [18–22]. Для неглубоких скважин, где гидростатическое давление столба жидкости на забой невелико — порядка нескольких мегапаскаль, виброисточник может эксплуатироваться с герметичной внутренней рабочей камерой, тем самым расширяется частотный диапазон генерируемых им колебаний, амплитуда которых будет возрастать с увеличением частоты. При достаточном потоке откачиваемого флюида, охлаждающего внешний корпус виброисточника вопрос о отводе тепла из подшипниковых узлов снимается. Такой виброисточник может работать совместно с винтовым или центробежным погружным насосом. Для больших глубин и соответственно больших гидростатических давлений герметизация внутренней рабочей камеры становится невозможной и тогда ее можно заполнить маслом или организовать прокачку флюида сквозь нее. Жидкость, находящаяся во внутренней камере, будет одновременно отводить тепло и смазывать трущиеся детали конструкции генератора [21, 22].

Цель работы — определить влияние жидкости, заполняющей рабочую камеру генератора колебаний, на работу виброисточника и нагрузку на привод. Для этого необходимо определить амплитудно-частотные характеристики виброскорости для герметичной и заполненной жидкостью внутренней камерой и по ним дать оценку эффективности работы виброисточника в низкочастотном диапазоне от 10 до 50 Гц.

Описание стенда и методики проведения эксперимента. Исследование динамики работы скважинного виброисточника дебалансного типа проводилось на испытательном стенде, который состоит из металлического каркаса с закрепленным на нем асинхронным электродвигателем, приводящим в работу виброисточник. Стенд оснащен также системами подачи и слива жидкости, датчиками для регистрации температуры и сейсмических колебаний (рис. 1).

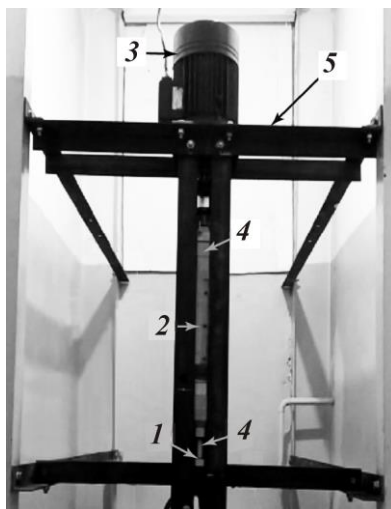


Рис. 1. Схема размещения дебалансного виброисточника на испытательном стенде: 1 — сейсмодатчик; 2 — внешний корпус источника; 3 — асинхронный электродвигатель; 4 — подшипниковые узлы; 5 — металлический каркас стенда

Виброисточник закреплен за каркас стенда и находится в вертикальном положении соосно с электроприводом, тем самым моделируется его расположение в скважине. К нему при помощи вала и упругой муфты с асинхронного электродвигателя передается вращательный момент. Частота магнитного поля статора электродвигателя задается преобразователем частоты АВВ

IP20 / UL Open type. Генерируемые виброисточником сейсмические колебания регистрируются сейсмодатчиком GMT-12.5, закрепленным на уровне подшипниковых узлов согласно ГОСТ ИСО 10816-1-97 [23]. На измерительный преобразователь HANDYSCOPE HS4 DIFF с сейсмодатчика в аналоговой форме поступает сигнал и далее с него уже в оцифрованном виде он записывается на персональный компьютер. Нагрев электродвигателя и подшипниковых узлов контролируется системой мониторинга, состоящей из цифровых датчиков температуры, микроконтроллера и персонального компьютера. Перед началом эксперимента внутренняя камера виброисточника заполнялась жидкостью. Проводилась серия измерений с частотами магнитного поля статора электродвигателя, меняющимися в диапазоне от 10 до 50 Гц с шагом 5 Гц, а затем измерения повторялись, но уже с сухой камерой.

Методика обработки экспериментальных данных сигналов виброскорости. После оцифровки сигнала виброскорости и записи его на персональный компьютер, он подвергался первичному анализу, который включал построение амплитудных спектров и выделение несущей частоты, генерируемой виброисточником. К сожалению, выделить главную гармонику с соответствующей несущей частотой, на которой работает виброисточник свыше 15 Гц, не удалось. Поэтому, учитывая 5 %-е скольжение асинхронного электродвигателя, для всех частот, задаваемых преобразователем частоты, проектировался узкополосный фильтр Чебышева с конечной импульсной характеристикой [24–26]. После его применения на сигнале виброскорости оставшиеся импульсные помехи были отсечены фильтром Тьюки с трехотсчетным окном. На рис. 2 показаны амплитудно-частотные спектры исходного и фильтрованного сигналов для несущей частоты 15 Гц.

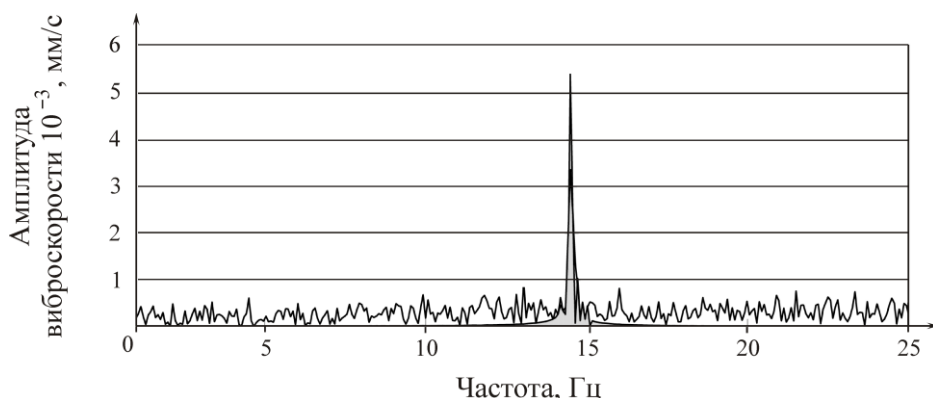


Рис. 2. Амплитудно-частотные спектры исходного сигнала виброскорости (сплошная линия без заливки) и после применения узкополосного фильтра (сплошная линия с заливкой)

В таблице представлены данные по частотным диапазонам с учетом 5 %-го скольжения асинхронного электродвигателя, задаваемым преобразователем частоты.

Частотные диапазоны фильтрованных сигналов

Номер	Частота, задаваемая преобразователем, Гц	Частотный диапазон с учетом 5 %-го скольжения асинхронного двигателя, Гц
1	10	9.50 – 10
2	15	14.25 – 15
3	20	19.00 – 20
4	25	23.75 – 25
5	30	28.50 – 30
6	35	33.25 – 35
7	40	38.00 – 40
8	45	42.75 – 45
9	50	47.50 – 50

По волновой форме фильтрованных сигналов оценивалась средняя из максимальных амплитуд виброскорости на заданном диапазоне частот (рис. 3).

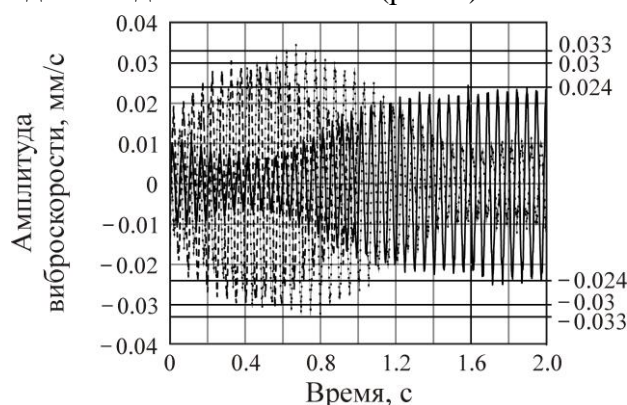


Рис. 3. Выделение максимальных амплитуд фильтрованных сигналов виброскорости в диапазоне частот 19–20 Гц с заполненной жидкостью внутренней камерой

Для каждой частоты, задаваемой преобразователем, проводилось по три эксперимента. В каждом измеренном сигнале после фильтрации выделялась максимальная амплитуда. После выполнения процедуры осреднения максимальных амплитуд сигналов виброскорости для каждого частотного диапазона, представленного в таблице, были получены результирующие амплитудно-частотные характеристики дебалансного виброисточника с сухой и заполненной жидкостью внутренней камерой. На рис. 4 показаны результаты обработки сигналов виброскорости.

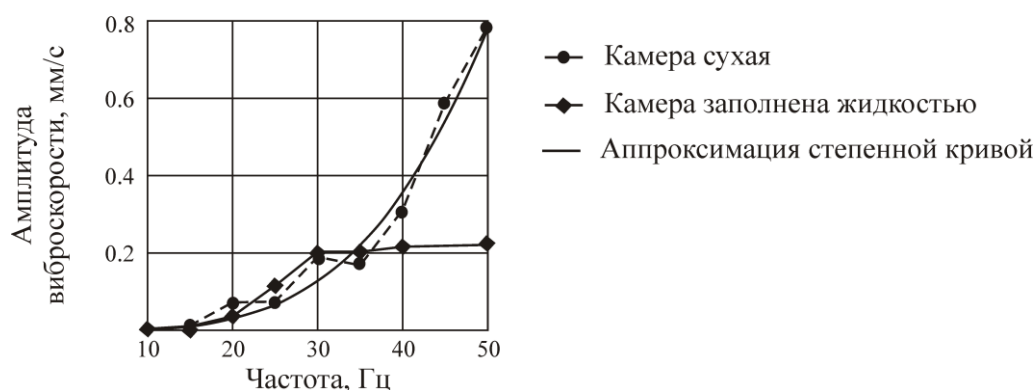


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики скоростного дебалансного виброисточника в низкочастотном диапазоне с сухой и заполненной жидкостью внутренней камерой

Для амплитуд, генерируемых источником с незаполненной внутренней камерой, построена аппроксимация степенной кривой вида $A = k f^b$, где A — амплитуда колебаний виброскорости, мм/с; f — частота, Гц; $k = 6.37 \cdot 10^{-7}$, $b = 3.59$.

ВЫВОДЫ

С увеличением частоты вращения привода, приводящим в работу дебалансный виброисточник, по степенному закону растет амплитуда виброскорости. При наличии жидкости во внутренней камере виброисточника, в которой вращается дебаланс, начиная с частоты 30 Гц прирост амплитуды виброскорости резко снижается и не подчиняется степенной зависимости, увеличивается скольжение привода. До частоты 30 Гц жидкость не оказывает заметного влияния на работу привода, максимальная разность амплитуд виброскорости с сухой и заполненной жидкостью внутренней камерой приходится на 25 Гц и составляет 0.04 мм/с. Поскольку резонансные частоты нефтяных пластов ниже 30 Гц, то на нефтепромыслах предпочтительно эксплуатировать дебалансные виброисточники с заполненной жидкостью внутренней рабочей камерой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Yakutseni V. P., Petrova Yu. E., and Sukhanov A. A.** Dynamics of the share of the relative content of hard-to-recover oil reserves in the total balance, *Oil and gas geology. Theory and practice*, 2007, no. 2, pp. 1–11. (in Russian) [**Якуцени В. П., Петрова Ю. Э., Суханов А. А.** Динамика доли относительного содержания трудноизвлекаемых запасов нефти в общем балансе // *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. — 2007. — № 2. — С. 1–11.]
2. **Maksutov R. A., Orlov G. I., and Osipov A. V.** Development of high-viscosity oil reserves in Russia, *Fuel and energy complex technologies*, 2005, no. 6, pp. 46–58. (in Russian) [**Максутов Р. А., Орлов Г. И., Осипов А. В.** Освоение запасов высоковязких нефтей в России // *Технологии ТЭК*. — 2005. — № 6. — С. 46–58.]
3. **Alekseev A. S., Geza N. I. et al.** Active seismology with powerful vibrational sources, Novosibirsk, Publishing of Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 2004, 375 pp. (in Russian) [**Алексеев А. С., Геза Н. И. и др.** Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. — 375 с.]
4. **Alekseev A. S., Glinskij B. M. et al.** New geotechnologies and complex geophysical methods for studying the internal structure and dynamics of geospheres. *Vibration geotechnology*, Moscow, Regional public organization of scientists by problems of applied geophysics, 2002, 470 pp. (in Russian) [**Алексеев А. С., Глинский Б. М. и др.** Новые геотехнологии и комплексные геофизические методы изучения внутренней структуры и динамики геосфер. Вибрационные геотехнологии. — М.: Региональная общественная организация ученых по проблемам прикладной геофизики, 2002. — 470 с.]
5. **Vasil'ev V. I., Evchatov G. P. et al.** Experimental studies of the process of excitation of seismic waves by a vibrational source. // *Questions of excitation of seismic waves by a vibrational source*, Novosibirsk, IGIG SB AS USSR, 1976, pp. 65–86. (in Russian) [**Васильев В. И., Евчатов Г. П. и др.** Экспериментальные исследования процесса возбуждения сейсмических волн вибрационным источником. // *Вопросы возбуждения сейсмических волн вибрационным источником*. — Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1976. — С. 65–86.]
6. **Sorokin V. N.** Distribution of pressures under the radiating plate of a surface seismic source, *Omsk scientific herald*, 2004, no. 1 (26), pp. 86–88. (in Russian) [**Сорокин В. Н.** Распределение давлений под излучающей плитой поверхностного сейсмического источника // *Омский научный вестник*. — 2004. — № 1 (26). — С. 86–88.]
7. **Sorokin V. N.** On the possibility of vibroprocessing oil deposits at several dominant frequencies, *Oil industry*, 2004, no. 11, pp. 44–47. (in Russian) [**Сорокин В. Н.** О возможности виброобработки нефтяных залежей на нескольких доминантных частотах // *Нефтяное хозяйство*. — 2004. — № 11. — С. 44–47.]
8. **Chichinin I. S. and Jushin V. I.** Frequency method of vibroseismic research, *Problems of vibrational transmission of the Earth*, ed. A. V. Nikolaeva, I. N. Galkina, Moscow, Nauka, 1977, pp. 14–31. (in Russian) [**Чичинин И. С., Юшин В. И.** Частотный метод вибросейсмических исследований. // *Проблемы вибрационного просвечивания Земли* / Под ред. А. В. Николаева, И. Н. Галкина, — М.: Наука, 1977. — С. 14–31.]
9. **Dyblenko V. P.** Wave methods of impact on oil reservoirs with hard-to-recover reserves. Review and classification, Moscow, “VNIIOENG”, 2008, 80 pp. (in Russian) [**Дыбленко В. П.** Волновые методы воздействия на нефтяные пласты с трудноизвлекаемыми запасами. Обзор и классификация. — М.: ОАО “ВНИИОЭНГ”, 2008. — 80 с.]
10. **Kravcov Ja. I. and Marfin E. A.** Wave influence on reservoir as a universal way of increasing the efficiency of extraction of heavy oils and natural bitumen, *Georesources*, 2011, no. 3(39), pp. 17–18. (in Russian) [**Кравцов Я. И., Марфин Е. А.** Волновое воздействие на продуктивные пласты как универсальный способ повышения эффективности добычи тяжелых нефтей и природных битумов // *Георесурсы*. — 2011. — № 3(39). — С. 17–18.]

11. **Marfin E. A., Kravcov Ja. I. et al.** Field testing of the wave impact on the oil production process at Pervomaiskoye oilfield, *Georesources*, 2014, no. 2(57), pp. 14–16. (in Russian) [**Марфин Е. А., Кравцов Я. И. и др.** Промысловые испытания волнового воздействия на процесс добычи нефти на Первомайском месторождении // *Георесурсы*. — 2014. — № 2 (57). — С. 14–16.]
12. **Malynakov E. N., Lakupchik A. V., and Demyanenko N. A.** Generalization of the results of testing oilfield chemistry for “Integrated work to improve the efficiency of development of deposits of the Vatyegan field”, *Oilfield chemistry, collection of materials of the V International scientific and practical conference*. Moscow, Russian State University of Oil and Gas, 2018, pp. 17–20. (in Russian) [**Малынаков Е. Н., Лакупчик А. В., Демяненко Н. А.** Обобщение результатов тестирования нефтепромысловой химии для “Комплексной работы по повышению эффективности разработки залежей Ватьеганского месторождения” // *Нефтепромысловая химия: сб. материалов V Междунар. науч.-практ. конф.* — М.: РГУ нефти и газа, 2018. — С. 17–20.]
13. **Dmitrieva A. Yu. and Musabirov M. Kh.** Research and development of fluorine-free chemical compositions for stimulating the Tula-Bobrikovsk deposits of PJSC “TatNeft”, *Oilfield chemistry, collection of materials of the V International scientific and practical conference*, Moscow, Russian State University of Oil and Gas, 2018, pp. 38–39. (in Russian) [**Дмитриева А. Ю., Мусабилов М. Х.** Исследование и разработка бесфторных химических композиций для стимуляции тульско-бобриковских отложений ПАО “Тат-Нефть” // *Нефтепромысловая химия: сб. материалов V Междунар. науч.-практ. конф.* — М.: РГУ нефти и газа, 2018. — С. 38–39.]
14. **Altunina L. K. and Kuvshinov V. A.** Physicochemical methods of enhanced oil recovery, *Saint Petersburg State University Bulletin, Physics and Chemistry, Ser. 4*, 2013, no. 2, pp. 46–76. (in Russian) [**Алтунина Л. К., Кувшинов В. А.** Физико-химические методы увеличения нефтеотдачи пластов // *Вестник СПбГУ. Физика и химия. Сер. 4.* — 2013. — Вып. 2. — С. 46–76.]
15. **Altunina L. K. and Kuvshinov V. A.** Increasing the efficiency of the thermal steam effect impact on deposits of high-viscosity oils by physicochemical methods, *Oilfield service (Technology fuel and energy complex)*, 2010, no. 3, pp. 38–41. (in Russian) [**Алтунина Л. К., Кувшинов В. А.** Увеличение эффективности паротеплового воздействия на залежи высоковязких нефтей физико-химическими методами // *Нефтесервис (Технологии ТЭК)*, — 2010. — № 3. — С. 38–41.]
16. **Altunina L. K., Kuvshinov V. A., and Stasieva L. A.** Temperature dependences of the rheological properties of the systems “viscous paraffinic oil – water phase – surfactant”, *Petrochemistry*, 2020, vol. 60, no. 3, pp. 369–376. (in Russian) [**Алтунина Л. К., Кувшинов В. А., Стасьева Л. А.** Температурные зависимости реологических свойств систем “вязкая парафинистая нефть – водная фаза – ПАВ” // *Нефтехимия*. — 2020. — Т. 60. — № 3. — С. 369–376.]
17. **Skiba S., Strukov D. et al.** Impact of biodegradation of oil on the kinetics of gas hydrate formation and decomposition. *J. Petroleum Science and Engineering*, 2020, vol. 192, pp. 107211.
18. **Savchenko A. V., Tsupov M. N., and Evstigneev D. S.** Investigation into operation dynamics of a downhole eccentric-type vibration source, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 262, no. 012060, pp. 1–6.
19. **Savchenko A. V., Evstigneev D. S., and Tsupov M. N.** Numerical modeling of eccentric mass rotation in chamber filled with fluid, *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, 2019, vol. 262, no. 012061, pp. 1–12.
20. **Stupin V. P., Sergeev A. A., and Kozlov A. V.** Debalance as a tool of vibration wave impact on a productive formation, *Modern trends and innovations in science and production: collection of materials of the VIII International scientific-practical conference, Mezhdurechensk*, 2019, pp. 138–143. (in Russian) [**Ступин В. П., Сергеев А. А., Козлов А. В.** Дебаланс как инструмент виброволнового воздействия на продуктивный пласт // *Современные тенденции и инновации в науке и производстве: сб. материалов VIII Междунар. науч.-практ. конф.* — Междуреченск. — 2019. — С. 138–143.]

21. **Flyantikov A. D., Savchenko A. V. et al.** Substantiation of design and energy parameters of a high-speed downhole unbalanced vibration source, *Fundamental and Applied Mining Science*, 2019, vol. 6, pp. 268–273. (in Russian) [**Флянтиков А. Д., Савченко А. В. и др.** Обоснование конструктивных и энергетических параметров скоростного скважинного дебалансного виброисточника // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. — 2019. — Т. 6. — С. 268–273.]
22. **Sergeev A. A., Tyugaev R. A., and Kozlov A. V.** Investigation of the influence of the cooling liquid on the temperature regime of the unbalanced vibration source in the well, *Modern trends and innovations in science and production, collection of materials of the IX International scientific-practical conference, Mezhdurechensk*, 2020, pp. 144–150. (in Russian) [**Сергеев А. А., Тюгаев Р. А., Козлов А. В.** Исследование влияния охлаждающей жидкости на температурный режим работы дебалансного виброисточника в скважине // *Современные тенденции и инновации в науке и производстве: сб. материалов IX Междунар. науч.-практ. конф.* — Междуреченск. — 2020. — С. 144–150.]
23. **GOST ISO 10816-1-97.** Mechanical vibration. Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts, Part 1, General guidelines, Moscow, Standartinform, 2007, 14 pp. (in Russian) [**ГОСТ ИСО 10816-1-97.** Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Ч. I. Общие требования. — М.: Стандартиформ, 2007. — 14 с.]
24. **Costa V. L., Schettino H. V. et. al.** Digital filters for clustered-OFDM-based PLC systems: Design and implementation, *Digital Signal Processing*, 2017, vol. 70, pp. 166–177.
25. **Saramäki T., Mitra S. K., and Kaiser J. F.** Finite impulse response filter design. Handbook for digital signal processing, 1993, vol. 4, pp. 155–277.
26. **Mitra S. K.** Digital signal processing: Computer-based approach, 4-th ed, McGraw-Hill, 2011, 972 pp.