



**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 отчистке 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).

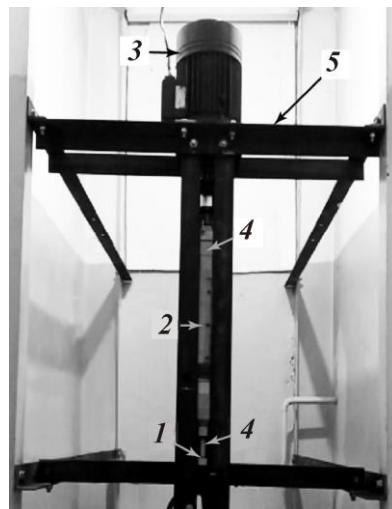


Рис. 1. Схема размещения дебалансного виброисточника на испытательном стенде: 1 — сейсмодатчик; 2 — внешний корпус источника; 3 — асинхронный электродвигатель; 4 — подшипниковые узлы; 5 — металлический каркас стенда

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 выше 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.

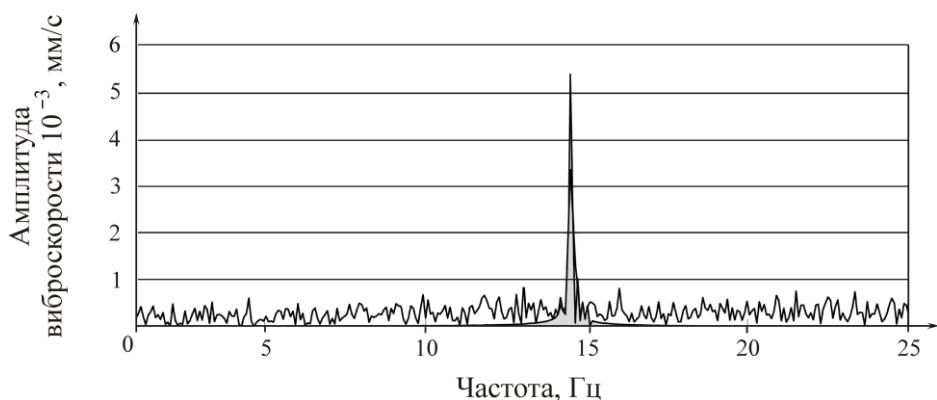


Рис. 2. Амплитудно-частотные спектры исходного сигнала виброскорости (сплошная линия без заливки) и после применения узкополосного фильтра (сплошная линия с заливкой)

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).

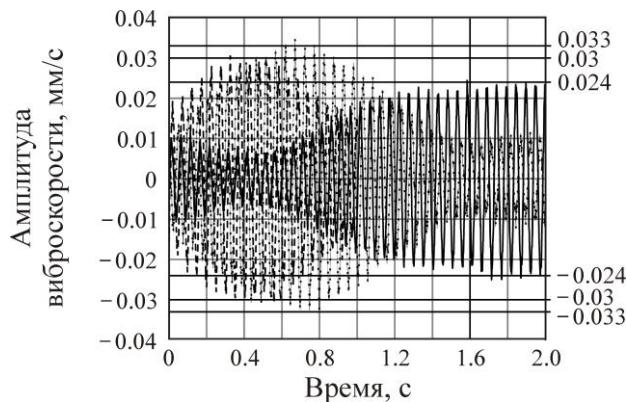


Рис. 3. Выделение максимальных амплитуд фильтрованных сигналов виброскорости в диапазоне частот 19–20 Гц с заполненной жидкостью внутренней камерой

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.

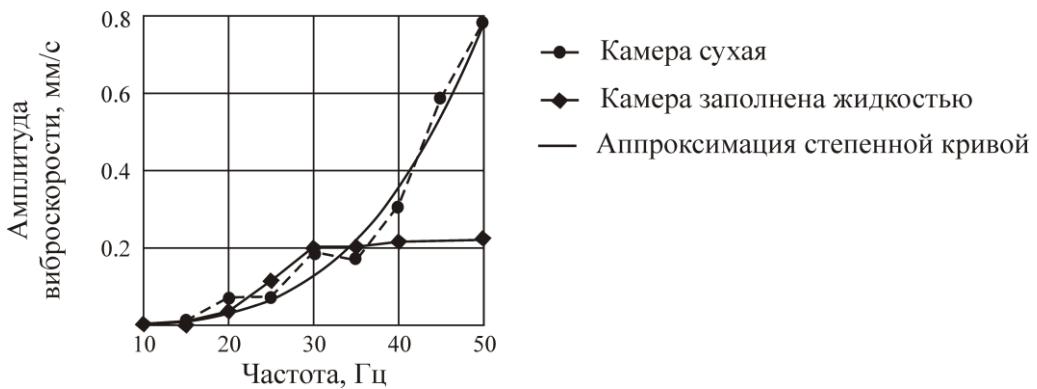


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики скоростного дебалансного виброисточника в низкочастотном диапазоне с сухой и заполненной жидкостью внутренней камерой

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) [Якущенко 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 нефей 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, IGI 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, “VNIIIOENG”, 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 нефей 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., Мусабиров 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 нефей 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.: Стандартинформ, 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.