

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ



УДК621.311.6:621.317.1

DOI:10.30724/1998-9903-2019-21-90-96

РАДИОЧАСТОТНЫЙ ГЕНЕРАТОР И ПРОГРАММАТОР ИМПУЛЬСНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ДЛЯ РЕЛАКСОМЕТРА ПМР

Чан Ван Тунг, Р.С. Кашаев

Казанский государственный энергетический университет
г. Казань, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6057-2367>, tvtung@cnd.edu.vn

Резюме: Описан генератор резонансной радиочастоты (РЧ) с шагом изменения частоты 50 кГц в диапазоне 5÷20 МГц и импульсный программатор РЧ-импульсов на основе ПЛИС для релаксометра протонного магнитного резонанса (ПМР). С использованием алгоритма прямого цифрового синтеза (ПЦС), генератор РЧ имеет возможность генерировать РЧ с коротким временем переключения и высоким разрешением по частоте и фазе. Для генерации последовательностей РЧ-импульсов используется программатор, реализованный в программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС) и управляемый вспомогательным контроллером ПЦС в соответствии с требуемыми последовательностями и параметрами импульсов. Проведено тестирование генератора методом компьютерного моделирования в программе QuartusII 12.1 и показана возможность синтеза последовательностей РЧ-импульсов с фазами 0, $\pi/2$, π , $3\pi/2$ с подстройкой резонансной частоты.

Ключевые слова: радиочастота, программатор импульсов, ПЛИС, релаксометр ПМР.

Благодарности: Авторы благодарны кафедре Приборостроения и мехатроники Казанского государственного энергетического университета за поддержку в создании оборудования.

Для цитирования: Чан Ван Тунг, Кашаев Р.С. Радиочастотный генератор и программатор импульсных последовательностей для релаксометра ПМР // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 3. С. 90-96. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-90-96.

RADIOFREQUENCY GENERATOR AND PROGRAMMER OF PULSE SEQUENCES FOR NMR RELAXOMETER

Tran Van Tung, R.S. Kashaev

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
nckien@cnd.edu.vn

ORCID¹: <https://orcid.org/0000-0001-6057-2367>, tvtung@cnd.edu.vn

Abstract: Described the generator of resonance radiofrequency with the step of change 50 kHz in the range 5÷20 MHz and pulse programmer of the pulse sequences for relaxometer of proton magnetic resonance (PMR). Using algorithm of direct digital synthesis (DSP), the RF generator has the ability to produce RF signal with a short switching time and high

resolution in frequency and phase. To facilitate the generation of RF pulses, used the pulse programmer implemented in the FPGA directed by the auxiliary controller DSP to generate RF pulses with required sequences and parameters. Realized the testing of the generator by method of computer modelling in the program Quartus II 12.1 and was shown the opportunities of synthesis of RF-pulses sequences with the phases 0 , $\pi/2$, π , $3\pi/2$ with resonance frequency tuning.

Key words: radiofrequency, pulse programmer, FPGA, relaxometer NMR.

Acknowledgments: The authors are grateful to the Department of Instrument Engineering and Mechatronics of Kazan State Power Engineering University for supporting research equipment.

For citation: Tran Van Tung, Kashaev RS. Radiofrequency generator and programmer of pulse sequences for PMR relaxometer. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22 (3):90-96. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-90-96.

Введение

Протонная магнитная резонансная релаксометрия (ПМР-релаксометрия) является областью РЧ-спектроскопии, предоставляющая широкие возможности для анализа смесей веществ в их разных фазах [1-3].

В структурной схеме и функциональных возможностях релаксометра ПМР определяющее значение принадлежит стабильности и способности к перестройки генераторарезонансной радиочастоты с малым шагом изменения частоты в широком диапазоне частот и импульсному программатору РЧ-импульсов с радиочастотным заполнением. Необходимо, чтобы программатор генерировал требуемые импульсные последовательности с коротким временем переключения и высоким разрешением по частоте и фазе. Чтобы адаптировать радиочастотные импульсы к различным последовательностям, их ширина и промежутки между импульсами, частота и амплитуда должны быть конфигурируемыми и программируемыми.

Традиционно синтез частоты достигается тремя способами: аналоговое микширование, фазовая автоподстройка частоты и прямой цифровой синтез. С развитием современных технологий, метод прямого цифрового синтеза (ПЦС), становится наиболее распространенным выбором для построения источника радиочастоты и РЧ-импульсов. В частности, для генератора последовательности импульсов ПМР-релаксометра этот метод имеет преимущество [4,5] и используется, кроме того, в качестве источника радиочастоты. Основная функция импульсной части ПМР-релаксометра заключается в создании шаблонов последовательности импульсов, что достигается с большей точностью, чем в цепях аналоговых схем.

Данная статья описывает детали реализации техники ПЦС и импульсного программатора с использованием программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС). Ранее прямой цифровой синтез был реализован в импульсном ЯМР-релаксометре [6], и показал ряд преимуществ. ПЛИС благодаря своей реконфигурируемой функции является также самой популярной технологией для реализации и тестирования новых схемотехнических решений и алгоритмов [7-10].

Материалы и методы

Радиочастотный генератор и программатор импульсов релаксометра ПМР может быть основан на алгоритме прямого цифрового синтеза (ПЦС) [8,11] путем генерации сигналов с помощью их цифровой обработки. Блок-схема ПЦС показана на рис. 1.

В цифровом блоке «Счетчик условного времени – Микропрограммное устройство-Аккумулятор фазы-Преобразователь фаза-амплитуда» генерируется изменяющийся во времени сигнал, а затем с помощью ЦАП он преобразуется в аналоговую форму. Поскольку операции являются цифровыми, это обеспечивает быстрое переключение между выходными частотами, лучшее разрешение по частоте. Выходной уровень ЦАП обновляется синхронно с основными часами. Поскольку на выходных фронтах тактовых импульсов имеются дискретные изменения выходного напряжения, на выходе ПЦС содержится сигнал с основной частотой наряду со многими высшими гармониками. Высшие гармоники отфильтровываются, пропуская их через фильтр низких частот [12-14].

Основными компонентами ПЦС являются фазовый аккумулятор, также называемый фазово-амплитудным преобразователем. Его максимальная выходная частота зависит от тактовой частоты и Слова настройки программы, которое хранится в регистре

частоты. Двоичное число в частотном регистре обеспечивает основной вход для фазового аккумулятора. Аккумулятор фазы представляет собой счетчик с переменным модулем, который увеличивает число, хранящееся в нем, каждый раз, когда он получает тактовый импульс.

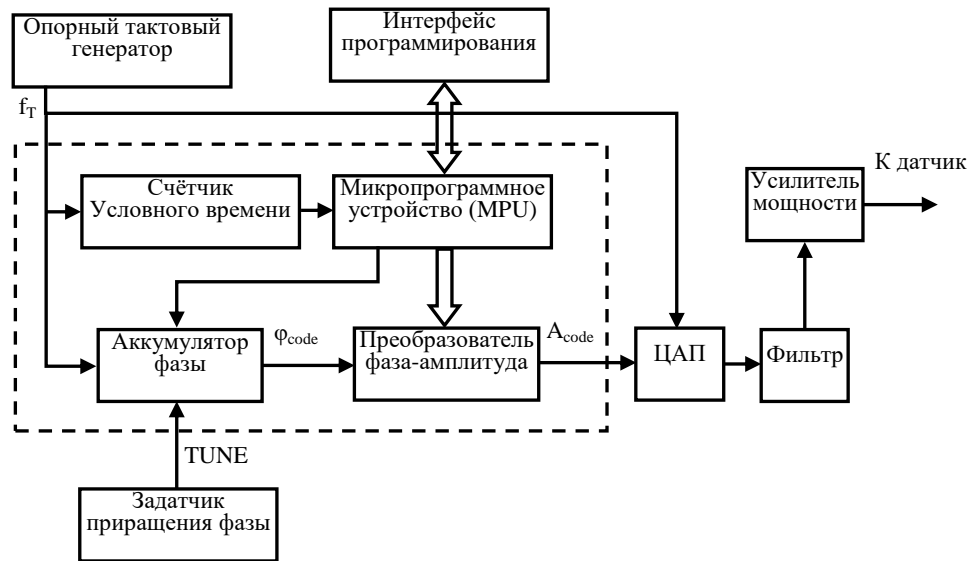


Рис. 1. Структурная схема генератора на основе ПЦС

Частота на выходе генератора зависит от сигнала $TUNE$ в соответствии с выражением

$$f_{\text{сннт}} = f_T \frac{TUNE}{2^{N_{\text{acc}}}}$$

где f_T – опорная тактовая частота. То есть частоту в соответствии с теоремой Котельникова можно задавать с шагом $(f_T/2^{N_{\text{acc}}})$ в пределах от 0 до $f_T/2$, где $f_{\text{сннт}}$ – выходная частота ПЦС, N_{acc} длина фазового аккумулятора.

Программируемый генератор импульсов встроен в ПЛИС, где конечный автомат был впервые написан с использованием редактора диаграмм состояний активного программного обеспечения *HDL*. Программатор импульсов должен генерировать временные последовательности, модулировать РЧ импульс перед его подачей в блок передатчика и приемника. Другая функция программатора импульсов заключается в изменении фазы РЧ-импульсов, чтобы наблюдать затухание свободной индукции или спиновое эхо запуском ПЦС в соответствующих фазовых точках [14-15].

Функции сигналов, генерируемых генератором импульсов:

- включить передатчик: то есть включить усилитель мощности РЧ-импульсов и в течение определенного времени возбуждать ядра образца, находящегося в датчике, модулированными РЧ-импульсами, длительности которых составляют 1-20 мкс;
- включить приемник на время, в течение которого приемник (усилитель сигналов ПМР) готов принять сигнал и отправить его на цифровой демодулятор;
- триггером включается блок сбора информации (1 -10 сек);
- РЧ фазовый контроль служит для изменения фазы ВЧ импульса (0° , 90° , 180° , 270°).

Импульсы с программатора показаны на рис.2.

ПЦС запрограммирован на генерирование ВЧ частоты (опорная частота). Этот сигнал направляется через фазовращатель, который контролируется программатором импульсов. Сдвиг фазы предназначен для подачи импульсов по направлению разных осей во вращающейся системе координат в векторной модели.

РЧ модулирующий импульс может состоять из одного 90° -го импульса для наблюдения затухания спада свободной индукции или из двух импульсов для наблюдения сигнала спинового эха. Код *VerilogHDL* записан для импульсов: 90° -го в направлении оси x, и 180° -го в направлении y.

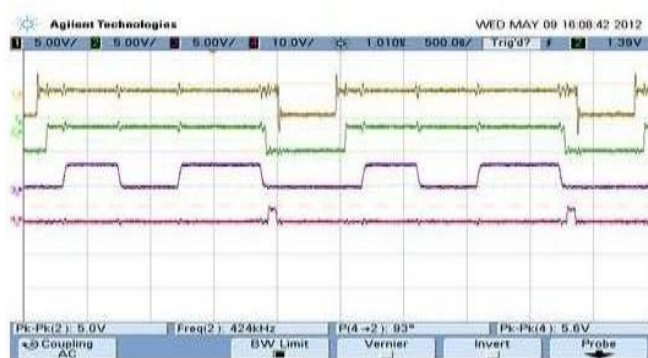


Рис.2. РЧ-импульсы с программатора

Последовательность двух импульсов показана на рис.3.

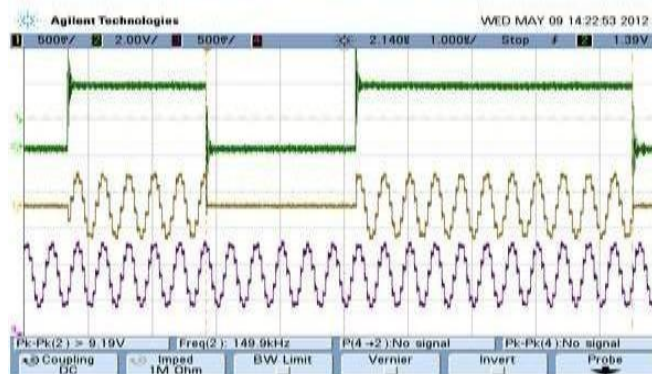


Рис.3. Два импульса (90° по оси x и 180° по оси y) на экране осциллографа

Релаксометр ПМР-ПМР-NP2п разработан под *USB*-порт, резонансную частоту 18.45 МГц, (Рис.4). Он состоит из четырех основных модулей: передатчика, датчика, приемника и модуля ПЛИС с прикладным программным обеспечением (рис.5), содержащим ПЦС и программатор импульса, описанные выше.

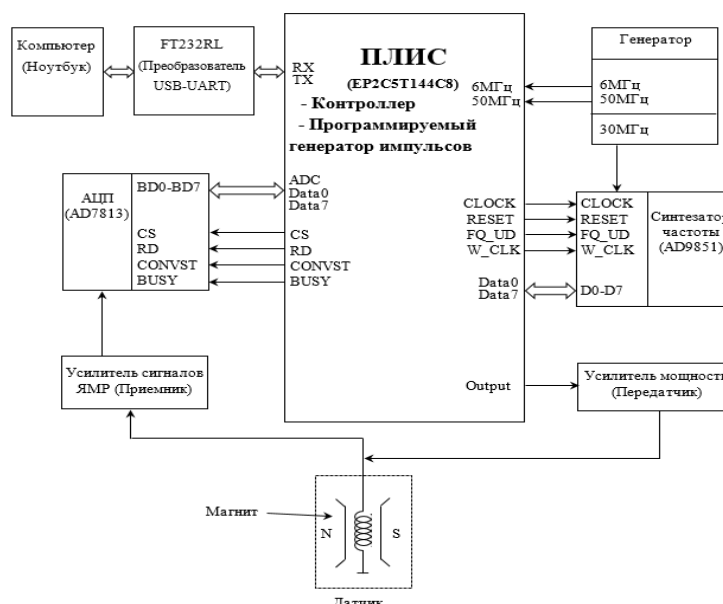


Рис.4. Блок-схема релаксометра ПМР-NP2п

Программа генерации последовательностей импульсов с ПЦС, сформированная в среде проектирования автоматизированных структур на ПЛИС *Altera Quartus II* показана на рис. 5.

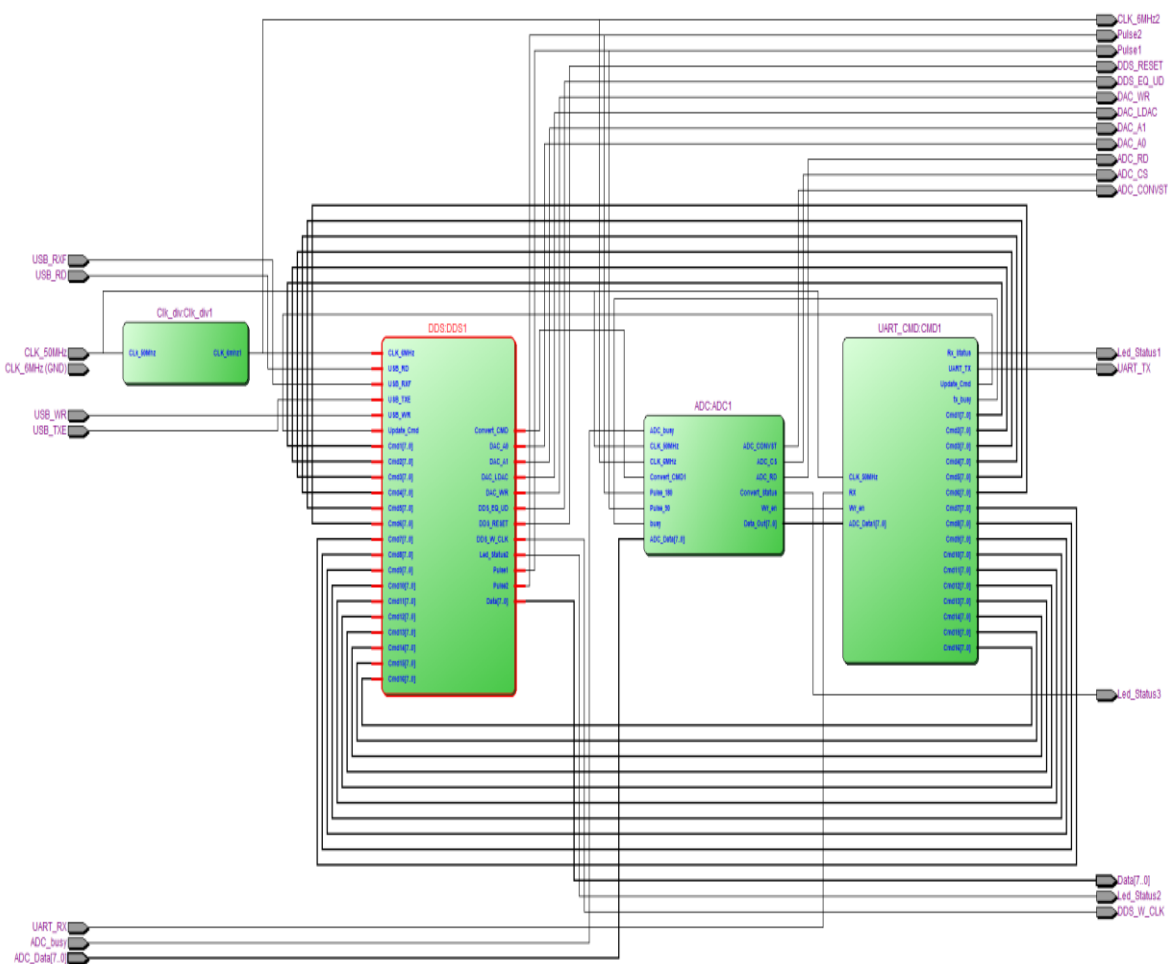


Рис. 5. Программа генерации последовательных импульсов с ПЦС, сформированная в среде проектирования автоматизированных структур на ПЛИС *AlteraQuartus II*

Заключение

В статье описан генератор резонансной радиочастоты (РЧ) с шагом изменения частоты 50 кГц в диапазоне 5÷20 МГц и импульсный программатор РЧ-импульсов на основе ПЛИС для релаксометра ПМР-*NP2*п. Через алгоритм прямого цифрового синтеза (ПЦС) разработан генератор резонансной частоты с коротким временем переключения и высоким разрешением по частоте и фазе. Для формирования последовательностей импульсов используется программатор, реализованный в программируемом ПЛИС и управляемый от ПЦС в соответствии с требуемыми параметрами импульсов. Проведено тестирование генератора методом компьютерного моделирования в программе *Quartus II 12.1* и показана возможность синтеза последовательностей РЧ-импульсов с фазами 0, $\pi/2$, π , $3\pi/2$ с подстройкой резонансной частоты.

Литература

1. Кашаев Р.С., А.Н.Темников., Тунг Ч.В., и др. Релаксометр протонного магнитного резонанса // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 2. С.145-148.
2. Mitchell J., Gladden L.F., Chandrasekerat.C., et al. Low-field permanent magnets for industrial process and quality control // Progress in nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy. 2014. V. 76. pp. 1-60.
3. Кашаев Р.С., Сунцов И.А., Киен Н.Т., др. Экспресс-метод и аппаратура протонного магнитного резонанса для измерения плотности нефтей // Журнал прикладной спектроскопии. 2019. Т.86. №2. С.263-268.
4. Лапшенков Е.М., Волков В.Я. Миниатюризация генератора последовательностей радиочастотных импульсов ЯМР-релаксометра // Современные наукоемкие технологии. 2017. № 9. С.42-47. AnalogDevices, CMOS 125 MHzcompleteDDSSynthesizer, AD9850
5. Голушко Д.А., Лысенко А.В., Калаев М.П. Цифровой генератор прямого синтеза для формирования многоканального испытательного сигнала с плавающей частотой // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 4(12). С. 73-78.

6. Волков В.Я. ЯМР в низких магнитных полях. Состояние и перспективы применения // Приборы. 2016. № 9. С. 21–27.
7. Соловьев В.В. Основы языка проектирования цифровой аппаратуры Verilog. М.: Горячая линия Телеком, 208 с. Доступно по: URL: <https://helpiks.org/6-33261.html> Ссылка активна на: 28.09.2019.
8. Афшин Одабай. Система питания ПЛИС AlteraArria 10 FPGA и Arria 10 SOC: проверенные решения для управления питанием // Вестник электроники. 2016. №1(55) С. 42-043.
9. PreetiHemnani., RajarajanA.K., Gopaljoshi., etal. FPGA based RF pulse generator for NQR/NMR spectrometer // Procedia Computer Science. 2016. V. 93. N. 6-8. pp. 161-168.
10. URL: <https://www.rlocman.ru/review/article.html?di=143994> (дата обращения 28.09.2019)
11. Иванов Д.В., Иванов В.А., Чернов А.А. Теоретические основы метода прямого цифрового синтеза радиосигналов для цифровых систем связи // Вестник ПГТУ. Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2012. №1. С. 30–34.
12. M. Suchenek and T. Starecki. Programmable pulse generator based on programmable logic and direct digital synthesis // Review of Scientific instruments. 2012. V. 83. N12. pp. 642-647.
13. Мершиев И.Г., Куприянова Г.С., Портативный ЯМР Релаксометр. Патент РФ на изобретение №156063. 27.10.2015. Бюл. №30. Доступно по: https://yandex.ru/patents/doc/RU156063U1_20151027. Ссылка активна на 18 октября 2019.
14. Муравьев Л.А., Долманский Ю.К. Программное обеспечение ЯМР-Релаксометра // Уральский геофизический вестник. 2010. №1(16). С.33-39.
15. Zalesskiy S.S., Danieli E., Blumich B., et al. Miniaturization of nMR Systems: Desktop Spectrometers, Microcoil Spectroscopy, and «PMR on a Chip» for Chemistry, Biochemistry, and Industry // Chem. Rev. 2014.V. 114. pp. 5641-5694.

Авторы публикации

Чан Ван Тунг – аспирант, Казанский государственный энергетический университет.

Кашиев Рустем Султанхамитович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Приборостроение и мехатроника», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Kashaev RS, A.N.Temnikov, Tung Ch.V., et al. Relaksometr protonnogo magnitnogo rezonansa. *Pribory i tekhnika eksperimenta*. 2019;2: 145-148.
2. Mitchell J, Gladden LF, Chandrasekerat C, et al. Low-field permanent magnets for industrial process and quality control. *Progress in nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*. 2014;76:1-60.
3. Kashaev RS, Suntsov IA, Kien N.T., et al. Ekspress-metod i apparatura protonnogo magnitnogo rezonansa dlya izmereniya plotnosti neftei. *Zhurnal prikladnoi spektroskopii*. 2019; 2(86): 263-268.
4. Lapshenkov EM, Volkov VYa. Miniaturizatsiya generatora posledovatel'nostei radiochastotnykh impul'sov YaMR-relaksometra. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2017;9:42-47. AnalogDevices, CMOS 125 MHzcompleteDDSsynthesizer, AD9850.
5. Golushkoyu DA, Lysenko AV, Kalaev MP. Tsifrovoy generator pryamogo sinteza dlya formirovaniya mnogokanal'nogo ispytatel'nogo signala s plavayushchei chastotoi. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem*. 2015;4(12):73-78.
6. Volkov VYa. PMR in low magnetic fields. *Status and application prospects*. Devices. 2016;9: 21-27.
7. Soloviev VV. Basics of the design language of digital equipment Verilog. M.: Hot line Telecom, 2014. 208 p Available at: /URL: <https://helpiks.org/6-33261.html>. Accessed to: 28 sept.2019
8. Afshin Odabai. Sistema pitaniya PLIS AlteraArria 10 FPGA i Arria 10 SOC: proverennye resheniya dlya upravleniya pitaniem. *Vestnik elektroniki*. 2016;1(55):42-43.
9. Preeti Hemnani, Rajarajan A.K, Gopal joshi, et al. FPGA based RF pulse generator for NQR/NMR spectrometer. *Procedia Computer Science*. 2016;93(6-8):161-168.
10. URL: <https://www.rlocman.ru/review/article.html?di=143994>. Accessed 28.sept.2019.
11. Ivanov DV, Ivanov VA, Chernov AA. Teoreticheskie osnovy metoda pryamogo tsifrovogo sinteza radiosignalov dlya tsifrovyykh sistem svyazi. *Vestnik PGTU. Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy*. 2012;1:30-34.
12. Suchenek and Starecki T M. Programmable pulse generator based on programmable logic and direct digital synthesis. *Review of Scientific instruments*. 2012;83(12):642-647.

13. Mershiey IG, Kupriyanova GS, Portativnyi. *YaMR Relaksometr*. Patent RF na izobretenie №156063. 27.10.2015. Byul. №30. Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU156063U1_20151027. Accessed: 18 oct 2019.

14. Murav'ev LA, Dolomanskii YuK. *Programmnoe obespechenie YaMR-Relaksometra. Ural'skii geofizicheskii vestnik*. 2010;(16):33-39.

15. Zalesskiy SS, Danieli E, Blumich B, et al. *Miniaturization of nMR Systems: Desktop Spectrometers, Microcoil Spectroscopy, and «PMR on a Chip» for Chemistry, Biochemistry, and Industry* Chem. Rev. 2014;114:5641-5694.

Authors of the publication

Tran Van Tung – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: tvtung@cnd.edu.vn.

Rustem S. Kashaev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

17 февраля 2020 г.