

3. Бондаренко, М. Г. Вибір методу та засобу моделювання для оцінки забруднення ґрунту атмосферними викидами теплової електростанції [Текст] / Збірник наукових праць Інституту геохімії навколишнього середовища. – Київ, 2009. – Вип. 17. – С. 67-73.
4. Jia Sun, Community Ecology For Innovation Systems Concept: The Case Of Cloud Computing [Текст] / Jia Sun, Ping Wang // Thirty Third International Conference on Information Systems. - Orlando 2012.
5. Антипин, Е. Г. Перспективы облачных вычислений [Текст] / Е. Г. Антипин, Д. С. Панченко // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганськ, 2011. – №3 (157).
6. Voorsluys, William "Introduction to Cloud Computing" [Текст] / In R. Buyya, J. Broberg, A.Goscinski. // Cloud Computing: Principles and Paradigms. New York. 2011, USA: Wiley Press. P. 1–44.
7. Peng, Y., Cloud computing model based on MPI and OpenMP [Текст] / Y. Peng, F. Wang // In Computer Engineering and Technology (ICCET), 2010 2nd International Conference on (Vol. 7, pp. V7-85). IEEE.
8. Скрипський, М. І., Застосування методів розсіювання Гауса та "хмарних" обчислень для моделювання розповсюдження домішок в атмосфері [Текст] / М. І. Скрипський, Г. І. Воробець // Матеріали 3-ї міжнародної науково-практичної конференції "фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки", 24-26 жовтня – Чернівці, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, 2013. – 122 с.
9. Визуальное исследование результатов моделирования лесных экосистем [Электронный ресурс] // Г. Андриенко, Н. Андриенко - Режим доступа: <http://geoanalytics.net/and/papers/silvics07.pdf>.
10. Taivalsaari, A. Objects in the cloud may be closer than they appear towards a taxonomy of web-based software [Текст] / A. Taivalsaari, T. Mikkonen // In Web Systems Evolution (WSE), 2011 13th IEEE International Symposium on (pp. 59-64). IEEE.

Розглянуто структурну схему лабораторного радіоспектрометра для імпульсного спостереження ЯКР у напівпровідниках GaSe та InSe. Прилад побудований за класичною схемою однокатушкового когерентного радіоспектрометра для діапазону $2 \div 50$ МГц.

Запропоновані схемотехнічні рішення для усунення «дзвону» приймальної котушки коливального контуру і пригнічення перехідного процесу в приймальному тракті імпульсного радіоспектрометр ЯКР

Ключові слова: радіоспектрометр, ЯКР, спінова індукція, перетворення Фур'є, напівпровідник, перехідний процес, когерентність

Рассмотрена структурная схема лабораторного радиоспектрометра, предназначенного для импульсного наблюдения ЯКР в полупроводниках GaSe и InSe. Прибор построен по классической схеме однокатушечного когерентного радиоспектрометра, работающего в диапазоне $2 \div 50$ МГц.

Предложены схемотехнические решения по устранению «звона» приемной катушки колебательного контура и подавлению переходного процесса в приемном тракте импульсного радиоспектрометра ЯКР

Ключевые слова: радиоспектрометр, ЯКР, спиновая индукция, преобразование Фурье, полупроводник, переходной процесс, когерентность

УДК 539.143.44

ИМПУЛЬСНЫЙ РАДИОСПЕКТРОМЕТР ЯКР С ЭФФЕКТИВНЫМ ПОДАВЛЕНИЕМ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА

А. Г. Хандожко

Доктор физико-математических наук, профессор*

E-mail: khand@chv.ukrpack.net

В. А. Хандожко

Аспирант*

E-mail: khand@chv.ukrpack.net

А. П. Самила

Кандидат технических наук, ассистент*

E-mail: asound@ukr.net

*Кафедра радиотехники и информационной безопасности

Институт физико-технических и компьютерных наук

Черновицкий национальный университет

им. Юрия Федьковича

ул. Университетская, 28, г. Черновцы,

Украина, 58000

1. Введение

Наличие квадрупольных моментов изотопов галлия и индия в GaSe и InSe позволяет применить для

изучения кристаллической структуры указанных соединений радиоспектроскопию ядерного квадрупольного резонанса (ЯКР) [1, 2]. Этот метод чрезвычайно чувствителен к изменению локального электрического

поля в кристаллической решетке, которое может быть вызвано даже незначительными сдвигами в матрице кристалла [3, 4]. Последние могут быть обусловлены движением дислокаций, перестройкой в системе точечных и структурных дефектов, деформацией, механической обработкой кристаллов. Преимущество ЯКР наряду с другими интегральными методами обусловлено локальным характером полученной информации, неразрушающим воздействием, высоким разрешением резонансных спектров, которое обеспечивается даже при комнатных температурах.

При регистрации ЯКР импульсными методами возникает проблема в устранении перегрузки приемного тракта радиоспектрометра во время действия зондирующего импульса и подавлении свободных колебаний после его окончания [5]. Последнее обусловлено остаточным «звоном» колебательного контура и может существенно увеличить «мертвую» зону приема сигнала индукции или даже полностью исключить его прием и усиление. В этом случае теряется полезная информация, которая важна при Фурье преобразовании сигнала спиновой индукции в резонансный спектр ЯКР.

2. Устройство спектрометра

Импульсный метод детектирования сигналов ядерного квадрупольного резонанса требует применения мощных возбуждающих радиочастотных импульсов и приемной аппаратуры высокой чувствительности [2, 6]. Структурная схема лабораторного радиоспектрометра, предложенного для импульсного наблюдения ЯКР в полупроводниках GaSe и InSe, изображена на рис. 1.

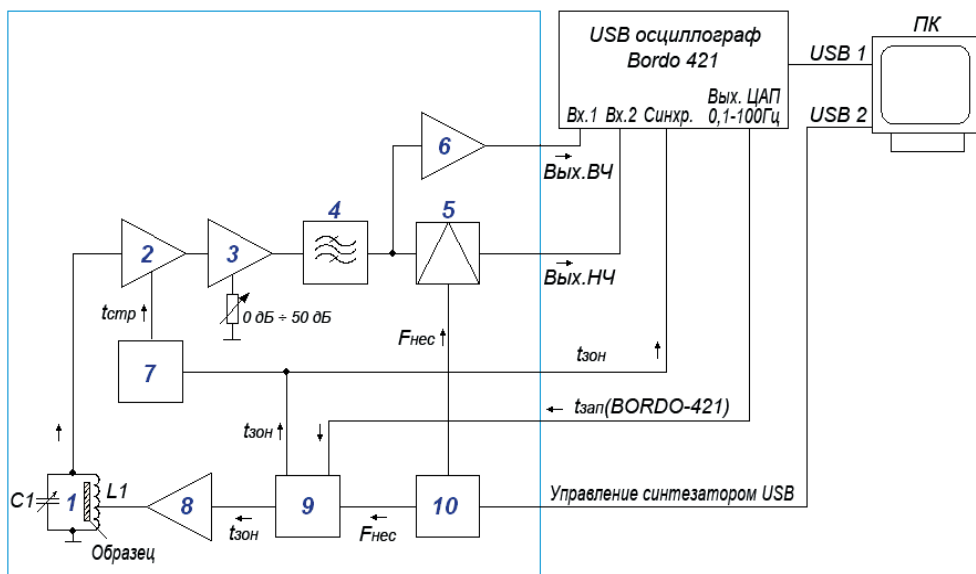


Рис. 1. Структурная схема радиоспектрометра ЯКР: 1 – приемная катушка с образцом; 2 – входной усилитель; 3 – аттенуатор, управляемый напряжением; 4 – полосовой фильтр на связанных контурах; 5 – синхронный детектор; 6 – согласующий усилитель; 7 – быстродействующие ключи; 8 – выходной усилитель ВЧ; 9 – формирователь зондирующего импульса; 10 – синтезатор несущей частоты

Источником несущей частоты является синтезатор (10), генерирующий частоты в диапазоне 0,3 ÷ 72–

85 МГц. Он служит для заполнения зондирующих импульсов в диапазоне резонансных частот ЯКР от 2 ÷ 50 МГц (изотопы ¹⁴N, ⁶⁹Ga, ⁷¹Ga, ¹¹³In, ¹¹⁵In) и формирования опорного напряжения для высокочастотного синхронного детектора (5). Установка частоты с выбранным шагом (50 ÷ 1000 Гц) производится посредством интерфейса синтезатора, подключенного к компьютеру через порт USB. Для ослабления проникновения несущей частоты в тракт приемника синтезатор смонтирован на отдельной плате, тщательно экранированной от других узлов спектрометра. С синтезатора частоты колебания ВЧ (рис. 2, а) поступает на формирователь (9) зондирующего импульса (рис. 2, в), собранный на высокоскоростных КМОП микросхемах серии 74АНСТ.

Созданный пакет колебаний несущей частоты (рис. 2, е) является зондирующим импульсом с длительностью $t_{зон}$, передний фронт которого определяется импульсом запуска и привязан к фазе колебания несущей частоты. Таким образом, обеспечивается когерентность работы спектрометра. Интервал между измерениями (t_{exp}) задается частотой импульсов (рис. 2, б), которые подаются на блок (9) с выхода ЦАП цифрового осциллографа Bordo 421 [7].

Формирователь зондирующего импульса $t_{зон}$ положительным фронтом запускает формирователь стробирующего импульса, длительность которого $t_{стр}$ устанавливается несколько большей, чем $t_{зон}$ (рис. 2, д). Превышение $t_{стр} > t_{зон}$ определяет длительность «звона» приемной катушки с образцом после действия высокочастотного заполнения зондирующего импульса (рис. 2, г), а также длительностью переходных процессов в приемном тракте спектрометра. Добавочное время $t_{зв} = t_{стр} - t_{зон}$ выбирается экспериментально и

определяется параметрами зондирующего импульса, зависящими от свойств исследуемого образца. Выходной усилитель (8) представляет собой высокочастотный передатчик, нагруженный на катушку с исследуемым образцом (1).

Реализация окончательного каскада высокочастотного усилителя мощности на полевом транзисторе MRF6V-P11KH [8] позволяет развить в катушке (1) зондирующие импульсы мощностью до 1 кВт.

Для регулировки коэффициента усиления сигнала спиновой индукции использован аттенуатор управляемый напряжением (3), диапазон изменения коэффициента усиления

которого составляет 0 ÷ 50 дБ, а полоса пропускания – 0 ÷ 150 МГц. Аттенуатор также обеспечивает со-

гласование уровней сигнала стробируемого усилителя и синхронного детектора для избегания перегрузки последнего и обеспечения его работы в линейном режиме.

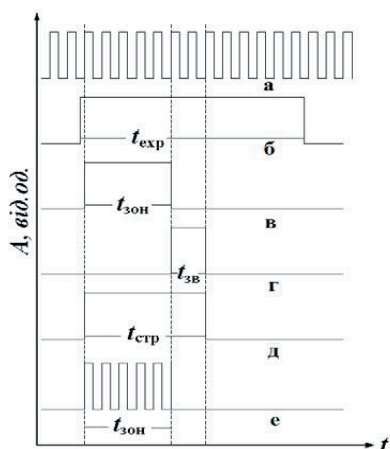


Рис. 2. Временные диаграммы работы радиоспектрометра: а – колебание несущей частоты, б – импульс характеризующий время эксперимента, в – зондирующий импульс, г – добавочный импульс, д – стробирующий импульс, е – зондирующий импульс

Для ослабления избыточного шума и паразитных гармоник введен полосовой фильтр (4) на основе связанных контуров. Полоса фильтра устанавливается в пределах $0,2 \div 1$ МГц и может перестраиваться по частоте. Выбор данной полосы обусловлен, главным образом, шириной спектра резонансного сигнала. Для ЯКР галлия и индия полоса устанавливается $0,3 \div 0,5$ МГц в диапазоне частот спиновых переходов $19 \div 41$ МГц.

Согласующий усилитель (6) нужен для согласования выходного сопротивления фильтра с волновым сопротивлением соединительного кабеля (50 Ом) и соответственно входным сопротивлением осциллографа Bordo 421. Основой усилителя является высокочастотный операционный усилитель с полосой пропускания 300 МГц.

Основой синхронного детектора (5) является балансный смеситель на микросхеме SA612 [9]. Схема работает с частотами сигналов до 500 МГц и частотами гетеродина до 200 МГц. Синхронная демодуляция осуществляется при подаче сигнала несущей частоты $F_{нес}$ и сигнала спиновой индукции на входы SA612. Оба сигнала подаются на входы дан-

ной микросхемы через фильтр ВЧ, срезающий частоты ниже резонансных. Для ядер Ga и In это частоты менее 19 МГц. Сигнал с синхронного детектора через согласующий усилитель подается на фильтр низких частот, подавляющий составляющие гармоники выше 350 кГц.

Диапазон частот фильтра $0 \div 350$ кГц обусловлен шириной мультиплетных спектров ЯКР в GaSe и InSe. Далее демодулированный низкочастотный сигнал через регулируемый и согласующий усилители подается на один из входов цифрового осциллографа Bordo 421. Сигнал может быть представлен в форме спада ядерной спиновой индукции, либо после быстрого преобразования Фурье – в виде первообразных линий резонансного поглощения.

3. Входной узел спектрометра

Назначение входной части спектрометра состоит в том, чтобы на очень короткое время ($1 \div 20$ мкс) подать мощный радиоимпульс с высокочастотным заполнением на катушку с образцом и немедленно перейти на прием сигнала спиновой индукции квадрупольных ядер.

В настоящем спектрометре предложен вариант приемного узла, упрощенная схема которого представлена на рис. 3.

Для развязки приемного контура и передатчика во время отсутствия возбуждающего импульса применены счетверенные группы диодов VD3 – VD14 типа 1N4148, нагруженные на резисторы номиналом 1 кОм (R2, R3). Объединение попарно соединенных диодов в группы обусловлено необходимостью прохождения тока до ~ 4 А в катушку во время возбуждающего импульса. Назначение такой цепи заключается в ослаблении просачивания несущей частоты и шума через емкости диодов со стороны передатчика (Tr2), а также в частичном подавлении «звона» колебательного контура.

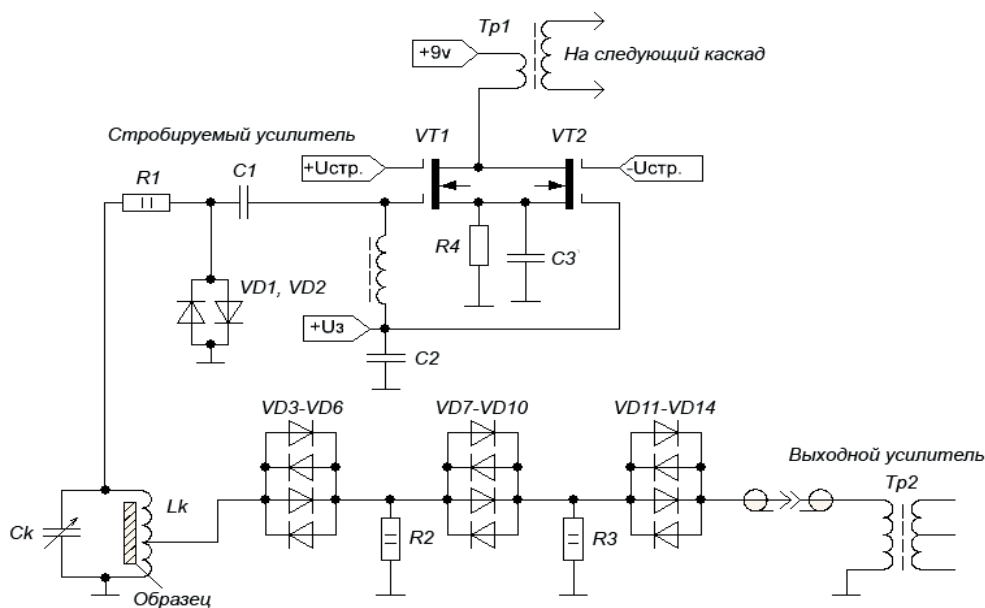


Рис. 3. Принципиальная схема входного узла спектрометра ЯКР

Количество витков катушки колебательного контура (L_k) зависит от диапазона рабочей частоты и объема образца. Для слитков GaSe, InSe, выращенных методом Бриджмена, диаметр приемной катушки может составлять 18 ± 20 мм, которая содержит 8 витков посеребренного провода (для частоты 20 МГц) или 5 витков для частоты 40 МГц. Для образцов объемом $\leq 0,25$ см³ используются катушки диаметром 7 ± 10 мм. Образцы с малым объемом использовались для исследования ЯКР в исходных монокристаллах GaSe и InSe, подготовленных для изготовления гетеропереходов методом «оптического контакта».

Для сохранения добротности контура и согласования с низкоомным выходом усилителя радиочастотной мощности выход передатчика подключен к части витков катушки. Отвод для согласования выходного сопротивления ($Tr2$) с входным сопротивлением колебательного контура производится от 25 ± 50 % витков катушки.

Защита входного каскада предусилителя приемника (VT1, VT2) от зондирующих радиочастотных импульсов выполнена на резисторе R1 и шунтирующих быстродействующих диодах VD1, VD2. Скорость переключения диодов составляет 4 нс.

4. Подавление переходного процесса в приемном тракте спектрометра

Несмотря на присутствие защитной цепи в момент включения зондирующего импульса в усилительном тракте приемника возникает переходной процесс. На рис. 4, а приведен переходной процесс на выходе предусилителя, вызванный возбуждающим импульсом. Оказалось, что использование защитной цепи типа R1, VD1, VD2 (рис. 3) не приводит к заметному ослаблению такого эффекта, особенно в случае применения для связи между каскадами широкополосных трансформаторов ($Tr1$).

В настоящей работе предложено схемотехническое решение, позволяющее устранить паразитный переходной процесс.

На рис. 5 показан 3-х каскадный стробируемый предусилитель, построенный на парах полевых транзисторов с изолированными затворами.

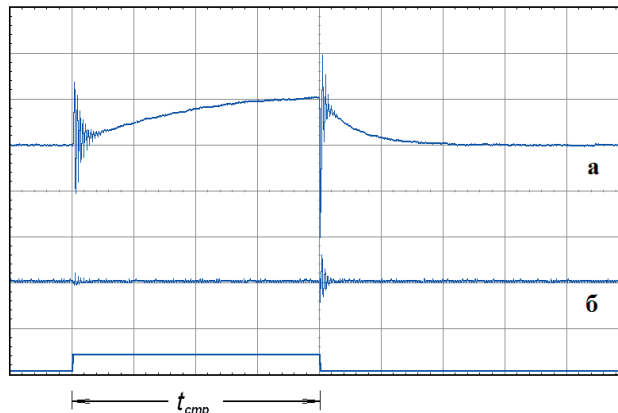


Рис. 4. Осциллограммы переходных процессов в предусилителе спинового сигнала: а – без схемы подавления; б – с применением специальной схемы подавления эффека; 1 дел./гор. = 4 мкс

Ключевое устройство на однозатворных полевых транзисторах для защиты широкополосного предусилителя было предложено в работе [5], однако коэффициент подавления несущей частоты во время действия мощных импульсов возбуждения составил лишь 60 дБ. В нашем случае надежное закрывание приемного тракта в паузах между зондирующими импульсами (до 100 дБ для несущей частоты) обеспечивается 3-мя однотипными каскадами на двухзатворных полевых транзисторах, соединенных параллельно по питанию. Рассмотрим работу отдельной схемы на VT1 и VT2. Ограниченное диодами VD1, VD2 до уровня $0,4 \div 0,6$ В остаточные колебания несущей частоты во время действия строб-импульса через разделительную емкость C1 поступают на первый затвор транзистора VT1. С выхода инвертора на микросхеме DD1 [10] на второй затвор транзистора VT1 подается логический «0», закрывающий транзистор и тем самым подавляя остаточные колебания несущей. Параллельно включенный транзистор VT2 открыт для прохождения постоянной составляющей за счет подачи не инвертированного строб импульса (логическая «1») на второй затвор. По окончании стробимпульса, который включает интервал $t_{30H} + t_{3B}$, функции транзисторов VT1 и VT2 меняются местами.

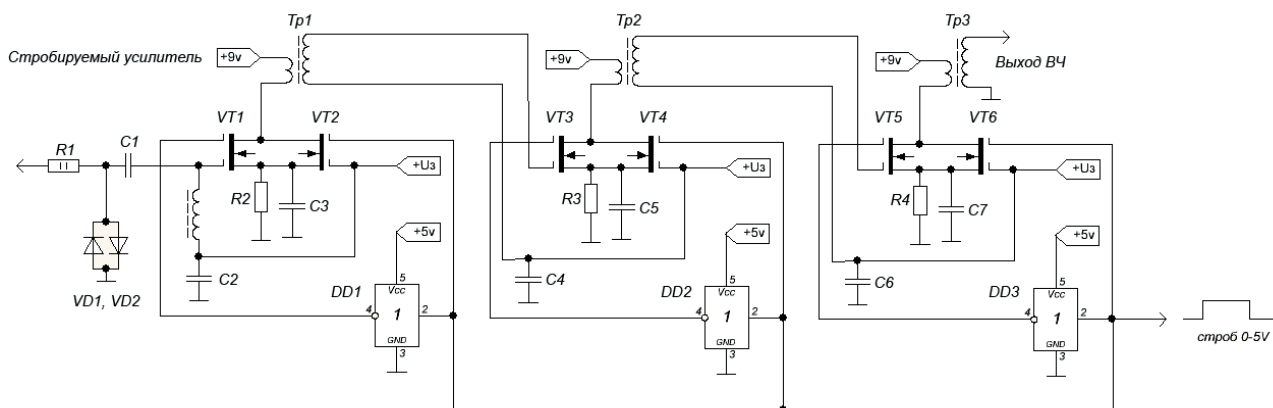


Рис. 5. Предусилитель сигнала спиновой индукции с трансформаторной связью между каскадами

В момент отсутствия строб-импульса на второй затвор транзистора VT2 поступает логический «ноль» и транзистор закрывается. Транзистор VT1 в это же время открывается из-за подачи логической «1» на второй затвор и пропускает постоянную составляющую и сигнал через нагрузку – обмотку разделительного трансформатора Tr1. Максимальное время переключения логического элемента микросхемы DD1 составляет не более 1,6 нс и, поэтому включение возбуждающего импульса и переход в режим приема сигнала индукции не приводит к заметному прерыванию постоянной составляющей в цепи стока полевых транзисторов и в первичной обмотке разделительного трансформатора (рис. 4, б). Последующие однотипные каскады работают аналогичным образом и усиливают эффект подавления остаточного сигнала несущей частоты и переходного процесса, возникающего из-за коммутации импульсов.

5. Выводы

1. Представлена структурная схема когерентного радиоспектрометра для исследования слоистых полупроводников GaSe и InSe методом ЯКР. Устройство отличается минимальным количеством функциональных узлов при сохранении чувствительности необходимой для регистрации сигналов спиновой индукции ЯКР.
2. Предложены схемотехнические решения по устранению «звона» приемной катушки колебательного контура и подавлению переходного процесса в приемном тракте импульсного радиоспектрометра ЯКР.
3. Надежное закрывание приемного тракта в паузах между зондирующими импульсами (до 100 дБ для несущей частоты) обеспечивается 3-мя однотипными каскадами на двухзатворных полевых транзисторах.

Литература

1. Bastow, T. J. A 69Ga, 115In NQR study of polytypes of GaS, GaSe and InSe [Текст] / T. J. Bastow, I. D. Cambell, H. J. Whitfield // Sol. St. Com. – 1981. – № 39. – P. 307-311.
2. Itozaki, Hideo. Nuclear quadrupole resonance for explosive detection [Текст] / Hideo Itozaki and Go Ota // International journal on smart sensing and intelligent systems. – 2007. – Vol. 1, № 3. – P. 705-715.
3. Kovalyuk, Z. D. Fine structure of NQR Spectra in GaSe [Текст] / Z. D. Kovalyuk, G. I. Lastivka, A. G. Khandozhko // Semiconductor physics, Quantum electronics and Optoelectronics. – 2009. – № 12(4). – P. 370-374.
4. Lastivka, G. I. The electric field gradient asymmetry parameter in InSe [Текст] / G. I. Lastivka, A. G. Khandozhko, Z. D. Kovalyuk, A. P. Samila // Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics. – 2011. № 2. – P. 164-166.
5. Rudakov, T. N. An Input Device for the Receiving Channel of a Nuclear Quadrupole Resonance Spectrometer [Текст] / T. N. Rudakov, A. A. Shpilevoi // Instruments and experimental techniques. – 1997. – Vol. 40, № 2. – P. 215-216.
6. Gabidullin, D. D. A Precision Frequency Synthesizer with Direct Digital Synthesis for a Low-Field Magnetic-Resonance Imager [Текст] / D. D. Gabidullin, N. M. Gafiyatullin, N. A. Krylatykh, and Ya. V. Fattakhov // Instruments and Experimental Techniques. – 2012. – Vol. 55, № 4. – P. 49-51.
7. Цифровой осциллограф BORDO B-421. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.cims.bsu.by/files/B-421.pdf>.
8. RF Power Field Effect Transistors. Technical Data. [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.freescale.com/files/rf_if/doc/data_sheet/MRF6VP11KH.pdf.
9. Double-balanced mixer and oscillator. [Электронный ресурс] / Режим доступа : <http://www.stanford.edu/class/ee133/datasheets/SA612A.pdf>.
10. Hex inverting Schmitt trigger with 5 V tolerant input. [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.nxp.com/documents/data_sheet/74LVC14A.pdf.