

УДК 621.396.621.57

Раннев Евгений Валерьевич

ЗАО Специальное конструкторское бюро «Хроматэк»

Россия, Йошкар-Ола¹

Инженер

E-Mail: evgeny.rannev@gmail.com

Цифровой квадратурный приемник ядерного магнитного резонанс - сигнала низкого разрешения

Аннотация: Одним из основных мешающих факторов, влияющих на обработку и различение регистрируемых сигналов ядерного магнитного резонанса низкого разрешения, а, следовательно, и на точность и достоверность результатов измерения, является шум, накладывающийся на полезный сигнал при прохождении последнего по приемному тракту релаксометра ядерного магнитного резонанса. В данной статье подробно рассматривается природа шума приемного тракта релаксометра ядерного магнитного резонанса и оцениваются его характеристики, предлагается замена аналоговой части приемного тракта на цифровой квадратурный детектор и теоретически рассчитывается выгода от исключения нескольких источников шума. Также предложен вариант реализации цифрового приемника релаксометра ядерного магнитного резонанса с рабочей частотой 20 МГц, в котором роль традиционных синхронных детекторов выполняет пара аналого-цифровых преобразователей, тактируемых ортогональными сигналами от одного генератора, при этом частота оцифровки может быть существенно понижена за счет узкополосности сигнала. Проведен реальный эксперимент, в результате которого было продемонстрировано, что цифровой приемник обеспечивает улучшение отношения сигнал/шум на выходе приемного тракта на 3.5 дБ и снижение коэффициента шума на 0.5 дБ.

Ключевые слова: Ядерный магнитный резонанс; релаксометр; квадратурный детектор; сигнал/шум; цифровой приемник; детектор огибающей; коэффициент шума.

Идентификационный номер статьи в журнале 70TVN114

¹ 424000, Россия, г. Йошкар-Ола, ул. Строителей, 94, ЗАО Специальное конструкторское бюро «Хроматэк»

Evgeny Rannev
JSC SDO Chromatec
Russian Federation, Yoshkar-Ola
E-Mail: evgeny.rannev@gmail.com

Digital quadrature receiver of time-domain NMR signal

Abstract: One of most reasonable obstructive factors, which are influence on processing and distinction of registered TD-NMR FID signals, as well as on accuracy and reliability of measurement results, is a noise superimposing on valuable signal when it's passes through receiving channel of TD-NMR relaxometer. In the current article nature of TD-NMR receiver's noise as well as its parameters are discussed in detail. Also replacement of analog part of receiving channel by digital quadrature detector is proposed and profit of such elimination of several noise sources is theoretically calculated. TD-NMR relaxometer's (20 MHz nuclear frequency) digital receiver was realized using a pair of ADC acting as traditional synchronous detectors and clocked by orthogonal pulses from one generator, despite the fact that sampling rate can be significantly reduced because of narrow bandwidth of receiving signal. Real experiment was carried out with following result: signal/noise ratio at the end of receiving channel was increased by 3.5 dB as well as noise coefficient was reduced by 0.5 dB.

Keywords: Nuclear magnetic resonance; relaxometer; quadrature detector; signal/noise; digital receiver; envelope detector; noise coefficient.

Identification number of article 70TVN114

Особенности приема и регистрации сигнала ядерного магнитного резонанса (ЯМР)

Традиционно, в импульсной ЯМР-спектроскопии сигналы регистрируются путем вычитания из них опорной частоты, близкой к ларморовой частоте ядра, оцифровки и дальнейшей численной обработки.

На первый взгляд, сигналы ЯМР можно просто оцифровывать с помощью АЦП, снимая данные с выхода преселектора. Однако, в спектре сигнала ЯМР-релаксометра, регистрируемого на частоте 20 МГц, все сигналы отдельных компонент имеют собственные частоты в диапазоне $20 \text{ МГц} \pm 5 \text{ кГц}$ [5]. Поэтому, высокая частота, с точки зрения заложенной в ней информации, не представляет интереса, поскольку она является всего лишь несущей. Поэтому в реальных приборах в приемном тракте применяются различные схемы детектирования (рис. 1).



Рис. 1. Структура системы регистрации сигналов ЯМР с детектированием

Сигнал, принимаемый датчиком ЯМР-релаксометра представляет собой амплитудно-модулированную несущую вида:

$$x(t) = x_m \cos(2\pi f_c t),$$

где $x_m(t)$ – интересующий нас модулирующий сигнал.

Для регистрации сигналов такого типа традиционно используют синхронный детектор, однако, когда опорный сигнал детектора не синхронизирован по фазе с несущей, то сдвиг фазы ϕ будет влиять на выходной сигнал:

$$x_m' = x_m \cos(\phi)$$

При этом, если $\phi = \pi/2$, то $x_m' = 0$.

Поскольку в случае ЯМР низкого разрешения модулирующий сигнал $x_m(t)$ всегда положителен, то его выделение из принятого сигнала можно осуществить с помощью детектора огибающей. При этом сохраняется проблема синхронизации, а именно, моменты регистрации

сигнала должны совпадать с нулевой фазой несущей. Однако, поскольку спад свободной индукции ЯМР-релаксометра является узкополосным сигналом, то детектировать такой сигнал можно с частотой, меньшей частоты несущей.

В связи с этим, чтобы избежать столкновения с проблемами синхронизации, при построении реальных ЯМР-приемников используют квадратурное детектирование.

Рассмотрим параметры АЦП, влияющие на процесс регистрации сигналов ЯМР. Как известно, минимальная скорость выборки, необходимая для адекватного описания сигнала ЯМР во временном представлении, определяется теоремой отсчетов, т.е. скорость выборки $f_s = 1/\Delta t$ должна быть как минимум в два раза больше наибольшей частоты f_{max} в спектре сигнала [9]:

$$f_s \geq 2f_{max}$$

Если в спектре сигнала будут присутствовать частоты, превышающие частоту Найквиста $f_N = 0,5f_s$, то они будут отражены в область частот $0 \leq f < f_N$ и вызовут наложение на другие, полезные сигналы в спектре. Даже если все частоты сигнала попадут внутрь спектрального диапазона, за его пределами останется сопутствующий аддитивный шум, который отразится в спектр полезных сигналов, существенно снижая чувствительность. Чтобы избежать подобного явления между детектором и АЦП ставят полосовой фильтр.

В итоге, в современной ЯМР-аппаратуре тракт приемника состоит из преселектора, квадратурного детектора, нормирующего усилителя, фильтра низких частот и аналого-цифрового преобразователя (рис.2).

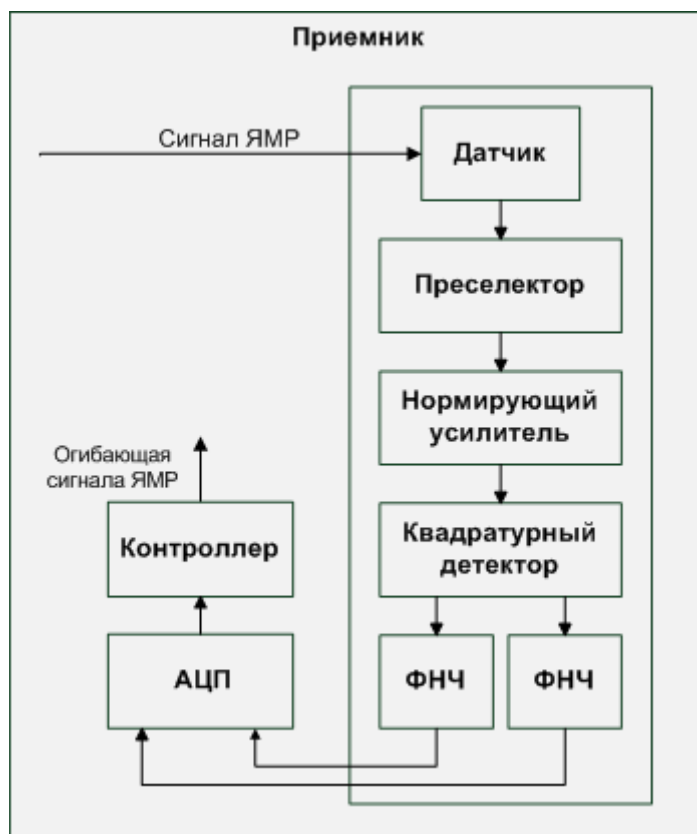


Рис. 2. Структурная схема приемника промышленного ЯМР-анализатора

Недостатком такого приемника является длина аналогового тракта, поскольку при прохождении сигнала через каждый модуль, на него накладываются дополнительные шумы.

Анализ шума приемного тракта ЯМР-релаксометра

Как известно, на входе любой системы всегда присутствует связанный с сигналом шум. Основным источником помех в электронных системах является тепловой шум, энергия которого возрастает с увеличением температуры. Тепловой шум возникает при флуктуациях электронов в проводниках, имеющих определенную температуру. Такие флуктуации имеют спектральные составляющие, находящиеся в той же полосе частот, что и полезные сигналы, тем самым затрудняя их обработку. Спектр такого шума однороден на всех частотах. Также существуют и другие явления, генерирующие случайный шум, например, дробовый шум, шум генерации и рекомбинации. Несмотря на их многообразие, они имеют одно свойство, общее с тепловым шумом – однородный спектр, равномерно распределенный в широкой полосе частот (до 5000 ГГц). Поэтому, будем рассматривать сумму шумовых составляющих как тепловой шум.

Сигнал и шум вместе проходят через систему и поэтому синхронно ослабляются или усиливаются каждым из каскадов. В большинстве случаев по значению абсолютного уровня мощности шума сложно оценить качество системы. Для этой цели удобнее пользоваться отношением мощностей сигнала и шума. Отношение сигнал/шум (S/N – signal to noise ratio) на выходе системы является параметром первостепенной важности для оценки качества системы.

Отличие между соотношением сигнал/шум на выходе и на входе заключается в том, что каждый каскад системы вносит свои собственные шумы, поэтому отношение сигнал/шум постепенно ухудшается при прохождении сигнала от входа до выхода системы. Вклад в шум, вносимый системой, количественно характеризуется коэффициентом шума:

$$F = \frac{(S/N)_{\text{вх}}}{(S/N)_{\text{вых}}},$$

где $(S/N)_{\text{вх}}$ – отношение сигнал/шум на входе системы;

$(S/N)_{\text{вых}}$ – отношение сигнал/шум на выходе системы.

Чем меньше численное значение коэффициента шума, тем меньший вклад вносит система в снижение отношения сигнал/шум. Коэффициент шума всегда $F \geq 1$. Идеальному нешумящему тракту соответствует $F = 1$ (0 дБ). Коэффициент шума может быть выражен как в безразмерных величинах, так и в децибелах, в зависимости от того, в чем выражены отношения сигнал/шум.

Эффективной шумовой температурой называется температура внутреннего сопротивления эквивалентного источника шума, которая приводит к появлению на нем такой же мощности шума, как и создаваемой промежуточным звеном системы [11].

Коэффициент шума и эффективная шумовая температура T_e связаны следующим выражением [11]:

$$T_e = T_0(F + 1), \quad (1)$$

где T_0 – нормальная температура, выраженная в градусах Кельвина.

Преобразовав выражение (1), получим формулу для определения коэффициента шума через известную эффективную шумовую температуру:

$$F = \frac{T_e}{T_0} + 1 \quad (2)$$

Для оценки качества дальнейших преобразований, рассчитаем максимальный коэффициент шума, вносимого в общий шум приемного тракта ЯМР блоком, состоящим из нормирующего усилителя, квадратурного детектора и ФНЧ (рис. 2). Коэффициент усиления всего каскада принимаем равным 1, поскольку функциональные изменения для шума и полезного сигнала одинаковы. Нормальная температура является постоянной величиной и принимается равной 290°К. Максимальная эффективная шумовая температура приемника была определена исходя из максимальной температуры эксплуатации: $T_e = 330^\circ\text{К}$. Подставив данные значения в формулу (2), получаем:

$$F_{\max} = \frac{330}{290} + 1 = 2,1379$$
$$F_{\max} (\text{дБ}) = 20\log(2,1379) = 6,6\text{дБ} \quad (3)$$

Разработка цифрового квадратурного детектора

Квадратурное детектирование заключается в использовании двух фазочувствительных детекторов с одинаковыми опорными частотами, но с различающимися на 90° фазами. Оба сигнала оцифровываются отдельно и образуют действительную и мнимую части комплексного спектра сигнала. Дальнейшее применение комплексного преобразования Фурье позволяет получить правильно распределенные отрицательные и положительные частоты. В ЯМР-релаксации построение спектра не применяется, а огибающая сигнала вычисляется из квадратурных составляющих:

$$A(t) = \sqrt{y_{\sin}^2(t) + y_{\cos}^2(t)},$$

Помимо меньшей требовательности к точной настройке резонансных условий ЯМР-релаксометра, большим преимуществом квадратурного детектирования относительно амплитудного является то, что отраженный шум не накладывается на шум в рабочем диапазоне [5]. По этой причине квадратурное детектирование широко используется в современной ЯМР-аппаратуре.



Рис. 3. Структурная схема приемника с цифровым квадратурным детектором огибающей

Тем не менее, в последнее время появились системы, использующие полную оцифровку сигнала высокоскоростными АЦП и дальнейшую обработку сигнала в цифровом виде. Такой системой, например, является Direct Digital Receiver (DDR) компании Varian. Современная элементная база позволяет использовать высокоскоростные АЦП – порядка 80 МГц для оцифровки сигнала на частоте 20 МГц. Недостатком данной системы являются большие аппаратные и программные затраты на обработку оцифрованного с высокой частотой сигнала, нецелесообразные в случае ЯМР-релаксации.

В качестве компромиссного варианта предложена структура приемника сигнала ЯМР, включающего в себя цифровой квадратурный детектор огибающей (рис. 3). Замена блоков синхронного детектора и ФНЧ на детектор огибающей стала возможной вследствие неотрицательности и узкополосности сигнала свободной индукции ЯМР. В свою очередь использование квадратурного детектирования позволяет обрабатывать сигнал со случайной начальной фазой. В предложенном цифровом квадратурном детекторе огибающей роль традиционных синхронных детекторов выполняет пара АЦП, тактируемых сигналами от опорного генератора, смещенными по фазе на 90° друг относительно друга (рис. 4).

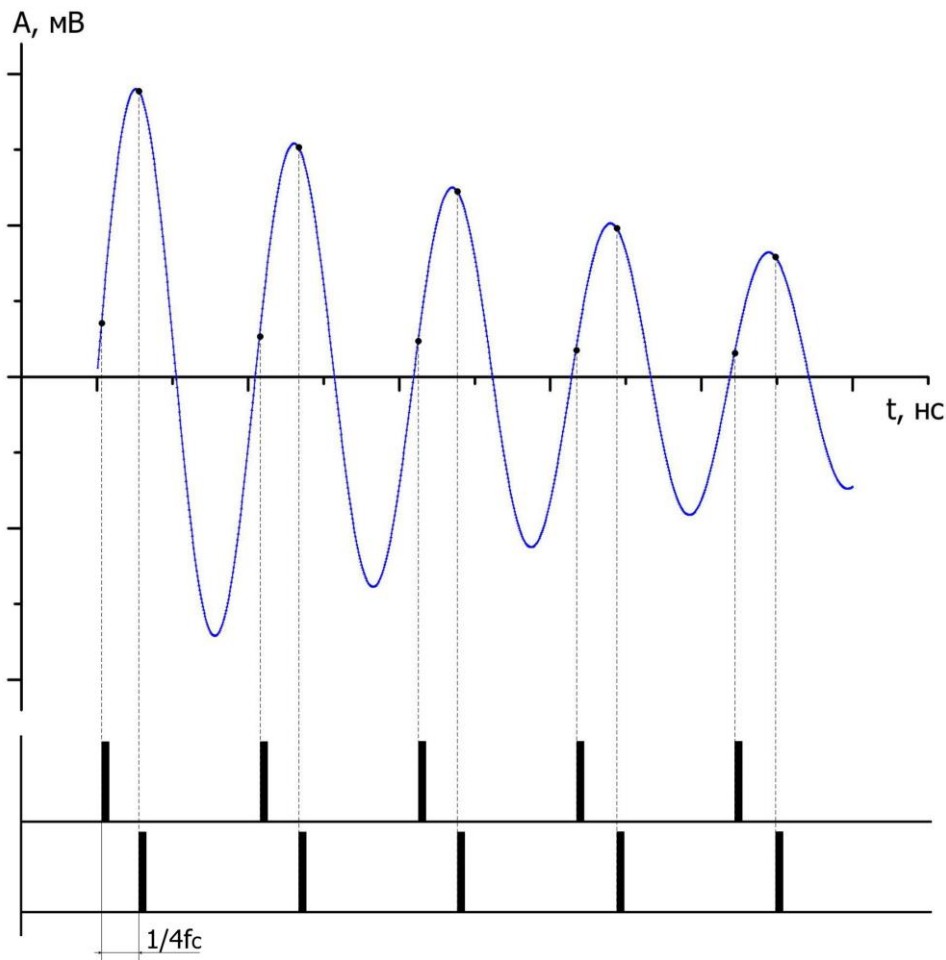


Рис. 4. Принцип формирования квадратурных выборок

Таким образом, в цифровом виде сразу формируется пара выборок квадратурных компонент огибающей.

Частота оцифровки в силу узкополосности сигнала может варьироваться от килогерц до максимальной частоты f_c . Используемый в данном исследовании тип ЯМР-анализаторов «Хроматэк Протон 20М» имеет среднюю частоту $f_c = 20$ МГц, следовательно, минимально возможные временные параметры будут таковы: период $1/f_c = 50$ нс, ширина квадратурного сдвига $= 1/4 f_c = 12.5$ нс. Выдерживание с заданной точностью таких временных интервалов не представляет сложности для современной элементной базы.

Данная система, теоретически, избавлена от шумов, вносимых аналоговым трактом классического приемника. Кроме того, такая система не требует внесения существенных изменений в программную часть ЯМР-релаксометра, поскольку итоговое представление сигнала остается неизменным.

Исходя из представленных выше расчетов (4.3), коэффициент шума в такой системе уменьшится на 6.6 дБ, следовательно, отношение сигнал/шум на выходе приемника увеличится. Теоретические расчеты проверим экспериментально.

Расчет соотношения сигнал/шум

По результатам фактических измерений соотношений сигнала к шуму различных образцов двухфазных систем было определено среднее значение соотношения сигнал/шум классического приемника равное ~ 200 ед., цифрового приемника – ~ 300 ед.

$$S / N_{\text{аналог}} (\text{дБ}) = 20 \log(200) = 46 \text{ дБ}$$

$$S / N_{\text{цифр}} (\text{дБ}) = 20 \log(300) = 49,5 \text{ дБ}$$

Рассчитаем коэффициент шума цифрового приемника, исходя из полученных данных:

$$F_{\text{аналог}} = \frac{(S / N)_{\text{вх}}}{(S / N)_{\text{аналог}}^{\text{вых}}}$$

$$F_{\text{цифр}} = \frac{(S / N)_{\text{вх}}}{(S / N)_{\text{цифр}}^{\text{вых}}}$$

Поскольку, считаем, что сигнал/шум на входе приемника в обоих случаях одинаков, то:

$$F_{\text{аналог}} * S / N_{\text{аналог}} = F_{\text{цифр}} * S / N_{\text{цифр}}$$

Следовательно:

$$F_{\text{цифр}} = \frac{F_{\text{аналог}} * S / N_{\text{аналог}}}{S / N_{\text{цифр}}} \quad (5)$$

Подставив экспериментально полученные значения в формулу (4.4), получим:

$$F_{\text{цифр}} = \frac{6,6 * 46}{49,5} = 6,13 \text{ дБ}$$

Выводы.

Использование цифровой схемы детектирования позволяет существенно сократить длину аналогового тракта, а, следовательно, зашумленность сигнала. Результаты экспериментов показали, что соотношение сигнал/шум для традиционного приемника колебалось в диапазоне 200-220 единиц, в то время как для предложенного приемника - не ниже 300-320 единиц. Разность соотношения сигнал/шум на выходе приемного тракта составила:

$$S / N_{\text{цифр}} (\text{дБ}) - S / N_{\text{аналог}} (\text{дБ}) = 49,5 - 46 = 3,5 \text{ дБ}$$

Коэффициент шума с использованием усовершенствованного приемного тракта с цифровым квадратурным детектором понизился на 0,5 дБ, что соответствует улучшению отношения сигнал/шум на 3,5 дБ. Полученный результат меньше первоначальной оценки, но, тем не менее, отражает динамику улучшения соотношения сигнал/шум.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дероум Э. Современные методы ЯМР для химических исследований / Пер. с англ. – М.: Мир. – 1992. – 403 с.
2. Вашман, А.А., Пронин, И.С. Ядерная магнитная релаксационная спектроскопия. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 232 с., ил.
3. Ганеев Р.М. Математические модели в задачах обработки сигналов. – М.: Горячая линия-Телеком, 2002. – 83 с.
4. Гришин Ю.П., Ипатов В.П., Казаринов Ю.М. Радиотехнические системы: учеб. для вузов по спец. «Радиотехника». – М.: Высш. шк., 1990. – 496 с.
5. Дероум Э. Современные методы ЯМР для химических исследований / Пер. с англ. – М.: Мир. – 1992. – 403 с.
6. Рудой Э.Н. Выделение огибающей звуковых сигналов // Материалы Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение - DSPA». – 2003.
7. Раннев Е.В. Анализ методов обработки данных ЯМР-анализаторов низкого разрешения /Раннев Е.В./ Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе: сборник материалов конференции: в 2 ч. – Ч.2. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2008. – С.210-213.
8. Раннев Е.В. Модель системы полного анализа сигналов ЯМР низкого разрешения /Раннев Е.В./ Сборник статей XI Международной научно-технической конференции МНИЦ ПГСХА «Информационно-вычислительные технологии и их приложения». – Пенза: РИО ПГСХА, 2009. – С.226-228.
9. Сергеенко В.С., Баринов В.В. Сжатие данных, речи, звука и изображений в телекоммуникационных системах: учеб. пособие. – М.: ИП «РадиоСофт», 2009. – 360 с.
10. Система регистрации сигналов ядерного магнитного резонанса низкого разрешения / Е.В. Раннев, В.И. Мясников: полезная модель Рос. Федерация №100292: заявл. 12.07.2010; опубл. 10.12.2010.
11. Read R. The essence of communications theory. – Prentice Hall Europe, – 1998.

Рецензент: Сидоркина Ирина Геннадьевна, д.т.н., профессор, ФБГОУ ВПО Поволжский Государственный Технологический Университет.

REFERENCES

1. Deroum Je. *Sovremennye metody JaMR dlja himicheskikh issledovanij / Per. s angl.* – М.: Mir. – 1992. – 403 s.
2. Vashman, A.A., Pronin, I.S. *Jadernaja magnitnaja relaksacionnaja spektroskopija.* – М.: Jenergoatomizdat, 1986. – 232 s., il.
3. Ganeev R.M. *Matematicheskie modeli v zadachah obrabotki signalov.* – М.: Gorjachaja linija-Telekom, 2002. – 83 s.
4. Grishin Ju.P., Ipatov V.P., Kazarinov Ju.M. *Radiotekhnicheskie sistemy: ucheb. dlja vuzov po spec. «Radiotekhnika».* – М.: Vyssh. shk., 1990. – 496 s.
5. Deroum Je. *Sovremennye metody JaMR dlja himicheskikh issledovanij / Per. s angl.* – М.: Mir. – 1992. – 403 s.
6. Rudoj Je.N. *Vydelenie ogibajushhej zvukovyh signalov // Materialy Mezhdunarodnoj konferencii «Cifrovaja obrabotka signalov i ee primenenie - DSPA».* – 2003.
7. Rannev E.V. *Analiz metodov obrabotki dannyh JaMR-analizatorov nizkogo razreshenija /Rannev E.V./ Informacionnye tehnologii v professional'noj dejatel'nosti i nauchnoj rabote: sbornik materialov konferencii: v 2 ch. – Ch.2. – Joshkar-Ola: MarGTU, 2008. – S.210-213.*
8. Rannev E.V. *Model' sistemy polnogo analiza signalov JaMR nizkogo razreshenija /Rannev E.V./ Sbornik statej XI Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii MNIC PGSHA «Informacionno-vychislitel'nye tehnologii i ih prilozhenija».* – Penza: RIO PGSHA, 2009. – S.226-228.
9. Sergeenko V.S., Barinov V.V. *Szhatie dannyh, rechi, zvuka i izobrazhenij v telekommunikacionnyh sistemah: ucheb. posobie.* – М.: IP «RadioSoft», 2009. – 360 s.
10. *Sistema registracii signalov jadernogo magnitnogo rezonansa nizkogo razreshenija / E.V. Rannev, V.I. Mjasnikov: poleznaja model' Ros. Federacija №100292: zajavl. 12.07.2010; opubl. 10.12.2010.*
11. Read R. *The essence of communications theory.* – Prentice Hall Europe, – 1998.