

choice the best candidate decides — specialist with concrete professional knowledges or man possessing common knowledges within the framework of the profession, — in European countries and in Ukraine.

**Keywords:** management, personnel, recruitment, personnel policies, mentality.

**УДК 621.373.52:539.1.078**

**Л. Ф. ПОЛИТАНСКИЙ**, д-р техн. наук, проф., зав.каф., Черновицкий национальный университет им. Юрия Федьковича, Черновцы;

**А. П. САМИЛА**, канд. техн. наук, ассистент, Черновицкий национальный университет им. Юрия Федьковича, Черновцы;

**В. А. ХАНДОЖКО**, аспирант, Черновицкий национальный университет им. Юрия Федьковича, Черновцы

## **АНАЛИЗ ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОДИННОГО СПИН-ДЕТЕКТОРА**

На основе малосигнальных эквивалентных схем проведена аналитическая оценка коэффициента шума и чувствительности асимметричного и симметричного автодинных спиновых детекторов. Показано, что при одинаковых условиях высокочастотной генерации коэффициент шума для симметричной схемы уменьшается примерно на 8,5%, а чувствительность возрастает на 4,7% в сравнении с асимметричной схемой. Исследована зависимость коэффициента шума ( $K_{ш}$ ) симметричного автодина от уровня высокочастотного напряжения на колебательном контуре ( $E$ ) и его добротности ( $Q$ ).

**Ключевые слова:** автодин, коэффициент шума, ядерная восприимчивость, спектральная плотность шума, малосигнальная эквивалентная схема.

### **Введение**

Несмотря на то, что в современных радиоспектрометрах преимущественно используется импульсная методика регистрации резонансных сигналов, метод автодинного детектирования спиновых резонансов еще достаточно актуален в технике стационарной спектроскопии, в частности, ядерного магнитного резонанса (ЯМР) [1]. Возможность перестройки резонансной частоты при сохранении высокой чувствительности в широком диапазоне частот позволяет успешно использовать автодин для регистрации спектров ядерного квадрупольного резонанса (ЯКР) [2] и размерных резонансов [3,4]. Современные методы обработки сигналов, в частности их цифровая фильтрация, позволяют существенно расширить возможности автодинных радиоспектрометров. Автодин - генератор слабых высокочастотных колебаний, амплитуда которых зависит от внесённых потерь в колебательный контур за счет ядерной динамической восприимчивости образца [5]. Поглощение энергии радиочастотного поля на резонансной частоте ядерной спиновой системой исследуемого образца приводит к уменьшению добротности контура и, как следствие вызывает изменение амплитуды высокочастотных (ВЧ) колебаний. Для эффективного поглощения энергии радиочастотного поля спиновой системой необходимо, чтобы добротность катушки с исследуемым веществом и коэффициент ее заполнения были по возможности максимальными [6].

При относительной простоте конструкции асимметричные схемы автодинных детекторов [1,2] имеют ряд недостатков, одним из которых является их чувствительность к посторонним электромагнитным помехам и акустическим шумам. Это ощутимо особенно при проведении низкотемпературных исследований, сопровождающихся сильными вибрационными помехами за счет кипения хладагента. Поэтому для исследования спектров ЯМР или ЯКР целесообразно использовать симметрично построенные генераторы [7,8]. Предложен в работе [4] такой генератор построен на двух истоковых повторителях ВЧ напряжения, работающих в противофазе. Симметрия электрической

© Л. Ф. ПОЛИТАНСКИЙ, А. П. САМИЛА, В. А. ХАНДОЖКО, 2012

схемы относительно заземления и шин питания позволила несколько ослабить влияние внешних наводок и вибрационных помех.

В большинстве случаев для характеристики автодинных спиновых детекторов приводят примеры зарегистрированных ими спектров. При этом, значения чувствительности, полученные с использованием калибраторов, зачастую не сопоставляются с теоретическими значениями.

Целью данной работы является анализ внутренних источников шумов автодинного спинового детектора, установление зависимости коэффициента шума и ядерной магнитной восприимчивости от рабочих режимов схемы, а также исследование влияния "симметризации" схемы на их значения. Принципиальная электрическая схема автодинного спин-детектора, малосигнальная модель которой использовалась для проведения расчетов коэффициента шума и чувствительности приведена на рис. 1.

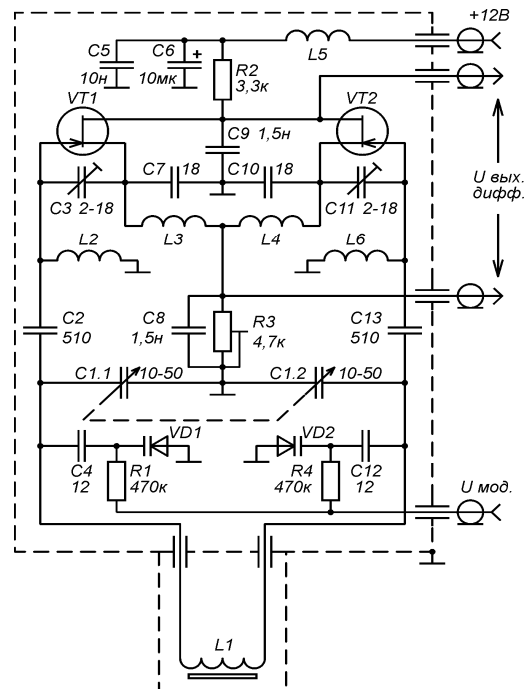


Рис.1 - Схема электрическая принципиальная симметрического автодинного спин-детектора: VT1, VT2 – BF245C, VD1, VD2 – BB139

### Коэффициент шума и чувствительность асимметрического автодина

Рассмотрим автодинный спин-детектор, собранный по схеме "емкостной трехточки" (схема Колпица) [5]. Для аналитической оценки уровня шумов воспользуемся малосигнальной схемой (рис.2) [8].

Схема условно разделена на три функциональные узлы: а) - колебательный контур, б) - входную цепь, в) - цепь обратной связи. Колебательный LC контур характеризуется эквивалентной параллельной проводимостью  $G_0 = G_i \Delta G$  и связанным с ней шумовым током  $i_0$ . Дополнительная проводимость  $\Delta G$  соответствует ЯМР поглощению. Колебательный контур может шунтироваться как элементами входной цепи радиоспектрометра, так и её полной проводимостью. Емкостные составляющие и составляющие, обусловленные реактивными компонентами включены в  $C$ , тогда как составляющие, связанные с активными компонентами сопротивления входят в  $G_i$  [8]. Генератор тока входных шумов  $i_i$  формируется соответствующими квадратичными комбинациями тепловых шумов всех шунтирующих элементов и шумом, обусловленным, входным током усилительного устройства. Последовательно включенный генератор шумовых напряжений  $v_n$  соответствует дробовому шуму, приведенному к входу. Этот источник моделирует также шумы устройства, которые пропорциональны  $1/f$ . Цепь обратной связи (ОС) включает генератор  $G_m v_1$  с нелинейной характеристикой. Активную составляющую эквивалентной полной проводимости представляет проводимость обратной связи  $G_j$ , емкостная составляющая этой проводимости включена в  $C$ . Суммарная проводимость схемы равна  $G = G_0 + G_i - G_j$  [8].

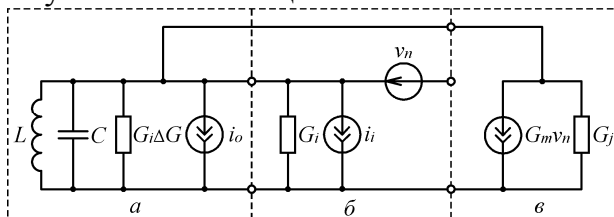


Рис. 2 - Малосигнальная модель автодинного спинового детектора

Изменение сопротивления  $|\Delta Z|$  и тангенса угла потерь при резонансе в параллельном LC колебательном контуре автодина обуславливающие изменение амплитуды и частоты

генерируемых колебаний за счет резонансного поглощения можно представить в следующем виде [9]:

$$\Delta U_{mg} = -2\pi\eta Q \chi'' \frac{(8S/|S''| - U_{mg}^2)}{U_{mg}}, \quad (1)$$

где  $S$  и  $S''$  - крутизна характеристики транзистора и ее вторая производная соответственно;  $\eta$  - коэффициент заполнения объема катушки образцом;  $Q$  - добротность контура;  $\chi''$  - ядерная магнитная восприимчивость.

Коэффициент шума представим соотношением [8]:

$$K_{ш} = \frac{S_i(f_M)}{S_L(f_0)}, \quad (2)$$

где  $S_i(f_M)$  - полная спектральная плотность входных шумов,  $S_L(f_0)$  - спектральная плотность шумов катушки. Представим спектральную плотность входных шумов  $S_i(f_M) = S_d(f_M) + S_m(f_M)$ . Учитывая, что для полевых транзисторов шумы типа  $1/f$   $S_m(f_M) \ll S_d(f_M)$  [10], можно записать  $S_i(f_M) \approx S_d(f_M)$ .

Спектральная плотность непосредственных шумов  $S_d(f_M)$  на частоте модуляции  $f_M$  [8]:

$$S_d(f_M) = \frac{S_{in}(f_0) + \alpha^2 \cdot S_{vn}(f_0)}{2C^2(\omega_M^2 + \omega_p^2)}, \quad (3)$$

где  $S_{in}(f_0)$  и  $S_{vn}(f_0)$  - спектральные плотности источников шумов  $i_n$  и  $v_n$  на несущей частоте  $f_0$ ,  $\omega_p = -3\gamma E^2/4C$  - коэффициент, характеризующий полосу пропускания,  $\omega_M$  - циклическая частота модуляции.

Чувствительность спектрометра  $\chi''_s$ , зависящую от частоты модуляции  $f_M$ , уровня ВЧ напряжения  $E$ , индуктивности катушки  $L$  и шумовых характеристик схемы, определяется выражением:

$$\chi''_s = \frac{\omega_M \cdot L}{E} \sqrt{S_{in}(f_0) + \alpha^2 \cdot S_{vn}(f_0)} \quad (4)$$

Чем меньше параметр  $\chi''_s$ , тем меньшие концентрации исследуемого вещества позволяет наблюдать радиоспектрометр.

Для определения амплитуды ВЧ колебаний  $E$  необходимо учесть нелинейный характер зависимости тока стока  $i_C$ , от напряжения затвор-исток  $u_{ЗИ}$  полевого транзистора [10]:

$$i_C = \alpha u_{ЗИ} + \gamma u_{ЗИ}^3, \quad (5)$$

где коэффициенты  $\alpha$  и  $\gamma$  соответственно равны:  $\alpha = |S|$ ,  $\gamma = -|S|/3U_H^2$  ( $U_H$  - напряжение насыщения затвор-исток).

### **Анализ шумовых токов и напряжений симметрического и асимметрического спин-детекторов**

Для анализа источников шумов симметрического и асимметрического автодинов на полевых транзисторах воспользуемся их малосигнальными эквивалентными схемами [11] (рис.3).

Суммарный шумовой ток асимметричной схемы  $i_n$  (рис.3,а) состоит из шумового тока колебательного контура  $\langle |i_0|^2 \rangle = 4kTG_0\Delta fQ^2$  и шумового тока  $i_i$ , величина которого с учетом эффекта стокового детектирования равна  $i_i = i_{n\alpha}/K'$  [8,12]. Таким образом, имеем:

$$i_n = i_0 + i_i = \sqrt{4kTG_0\Delta fQ^2} + i_{n\alpha} / K'. \quad (6)$$

На схеме (рис.3,а)  $\langle |i_{nc}|^2 \rangle = 8kTS/3$  - среднеквадратический шумовой ток обусловленный конечным сопротивлением канала транзистора,  $\langle |i_{n3}|^2 \rangle = 0,3(4kT/S)\omega_0^2 \cdot C_{ЗИ}$  - среднеквадратическое значение тока теплового шума канала, вызванного флуктуациями заряда в обедненной области затвор-канал, и  $\langle |i_{n30}|^2 \rangle = 2qI_{30\text{обр}}$  - среднеквадратическое значение шумового тока, обусловленное прохождением постоянного тока через барьерные

переходы в полевом транзисторе. Поскольку, токи  $i_{nC}$  и  $i_{n3}$  (рис.3), обусловлены одним и тем же физическим механизмом, то они частично коррелируют между собой, значение коэффициента корреляции определяется выражением [11]:

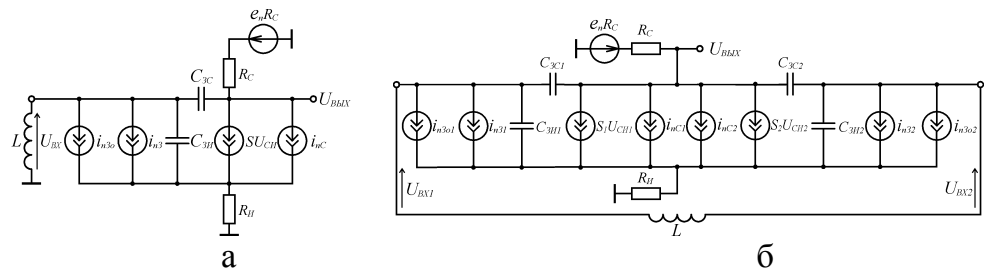


Рис.3 - Эквивалентные схемы автодифференциальных спиновых детекторов в малосигнальном приближении: а - асимметрическая, б – симметрическая

$$C_r = \frac{\langle i_{nC} \cdot i_{n3} \rangle}{\left[ \langle |i_{nC}|^2 \rangle \cdot \langle |i_{n3}|^2 \rangle \right]^{1/2}} \approx -j\alpha, \quad (7)$$

где  $\alpha \approx 0,4$ . Следовательно, среднеквадратическое значение суммы шумовых токов  $i_{nC}$  и  $i_{nG}$  с учетом их взаимной корреляции равно [11]:

$$\langle |i_{n\alpha}|^2 \rangle = \sum_i \langle |i_n(\alpha_i)|^2 \rangle - j\alpha\omega_o \left[ \frac{C_{3И}}{S} + C_{3C} \left( \frac{1}{S} + \frac{1}{2S'} \right) \right] \cdot \sqrt{\langle |i_{nC}|^2 \rangle \cdot \langle |i_{n3}|^2 \rangle} \quad (8)$$

Токи  $i_n(\alpha_i)$  эквивалентных входных генераторов для каждого источника шума  $\alpha_i$ , рассчитываются по формуле

$$i_n(\alpha_i) = i_i(\alpha_i) - j\omega[C_{3И} / 2 + C_{3C}(1 + S / 2S')] \cdot e_n(\alpha_i) \quad (9)$$

В табл.1 и 2 приведены выражения, полученные из (9) для источников шумовых напряжений и токов на входе, соответствующие реальным источникам  $\alpha_i$  полученные для асимметрической и симметрической схем (рис.3) [11].

Таблица 1 – Выражения для источников шумовых напряжений и токов

Реальный источник шума, $\alpha_i$	Вклад шумового напряжения, $e_n(\alpha_i)$	Вклад шумового тока, $i_n(\alpha_i)$
$i_{n3}$	-	$i_{n3}$
$i_{nC}$	$i_{nC} / S$	$-j\omega \frac{i_{nC}}{2} \left( \frac{C_{3И}}{S} - \frac{C_{3C}}{S'} \right)$

Таблица 2 - Выражения для источников шумовых напряжений и токов

Реальный источник шума, $\alpha_i$	Вклад шумового напряжения, $e_n(\alpha_i)$	Вклад шумового тока, $i_n(\alpha_i)$
$i_{n3Oi}$	-	$i_{n3Oi}$
$i_{n3i}$	-	$i_{n3i}$
$i_{nC1}$	$i_{nC1} / S$	$-j\omega \frac{i_{nC1}}{2} \left( \frac{C_{3И1}}{S} - \frac{C_{3C1}}{S'} \right)$
$i_{nC2}$	$i_{nC2} / S$	$-j\omega \frac{i_{nC2}}{2} \left( \frac{C_{3И2}}{S} + \frac{C_{3C2}}{S'} \right)$

С учетом выражений (табл.2) формула (8) приобретет вид:

$$\langle |i_{n\alpha}|^2 \rangle = \left[ \left\langle \left[ -j\omega_o \frac{i_{nC1}}{2} \left( \frac{C_{3И1}}{S} - \frac{C_{3C1}}{S'} \right) \right]^2 \right\rangle + \left\langle \left[ -j\omega_o \frac{i_{nC2}}{2} \left( \frac{C_{3И2}}{S} + \frac{C_{3C2}}{S'} \right) \right]^2 \right\rangle + \langle |i_{n3}|^2 \rangle \cdot \langle |i_{n32}|^2 \rangle \right] - 2\alpha \cdot 2\mathcal{I} \left[ \frac{C_{3И}}{S} + C_{3C} \left( \frac{1}{S} + \frac{1}{2S'} \right) \right] \cdot \sqrt{\langle |i_{nC1}|^2 \rangle \cdot \langle |i_{n31}|^2 \rangle} \quad (10)$$

Для расчета коэффициента шума и чувствительности спин-детектора согласно (2-4) определим напряжение дробового шума с учетом эффекта стокового детектирования  $v_n = i_{n30} \cdot R_k \cdot K' / K$  [8].

Коэффициент усиления каскада по напряжению:

$$K = S \cdot \frac{R_H}{1 + g_{22H} \cdot R_H}, \quad (11)$$

где  $R_H=R_D$  – нагрузочное сопротивление каскада,  $g_{22H}$  – активная составляющая входной проводимости транзистора.

Коэффициент усиления сигналов низкой частоты, характеризующий эффект детектирования:

$$K' \approx \delta V_K / \delta V \approx (SR_S)^2, \quad (12)$$

где  $\delta V_K$  – изменение напряжения на выходе каскада,  $\delta V$  – изменение напряжения несущей частоты.

### Результаты математического моделирования

Исследование зависимостей шума и чувствительности автодинных спиновых детекторов (рис.3) от амплитуды ВЧ напряжения на колебательном контуре  $E$ , его добротности  $Q$  и частоты модуляции условий резонанса  $f_M$  осуществлялось с использованием построенной математической модели в программной среде MathCAD.

Расчётные зависимости коэффициента шума  $K_{ш}$  и чувствительности  $\chi''$  [8] симметрического автодина от амплитуды ВЧ колебаний  $E$  при катушках с разными добротностями  $Q$  приведена на рис.4, а. Приведенные зависимости соответствуют частотемодуляции  $f_M=100$  Гц и частоте несущих колебаний  $f_0=28$  МГц. Амплитуда ВЧ колебаний определяется: собственной проводимостью колебательного контура  $G_0$ , проводимостью цепи ОС  $G_j$ , крутизной и нелинейностью характеристик используемого для расчетов автодинов транзистора BF245 [10]. Также при анализе схемы была исследована зависимость чувствительности  $\chi''$  от частоты модуляции промоделированная для несущей  $f_0=28$  МГц при разных напряжениях ВЧ на контуре (рис.4, б). Зависимости коэффициента шума симметрического автодина от ВЧ напряжения на контуре и его добротности приведены на рис. 5. При расчете проводимостей  $G_0$  и  $G_j$  учтены конструктивные параметры катушки LC - контура, элементов цепи ОС и удельные проводимости примененных материалов.

В процессе анализа проведенного на основе эквивалентных малосигнальных схем и математического моделирования получены зависимости коэффициента шума и чувствительности от амплитуды ВЧ

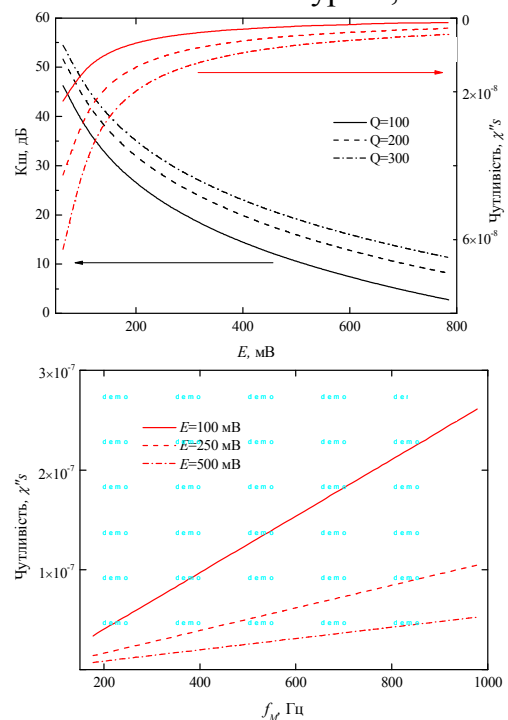


Рис. 4 - Расчетные зависимости, полученные для симметрического автодинного спин-детектора: а - зависимость коэффициента шума и чувствительности от ВЧ напряжения на контуре; б - зависимость чувствительности  $\chi''$  от частоты модуляции

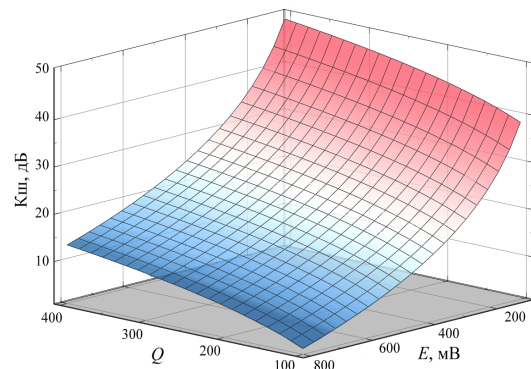


Рис.5 - Зависимость коэффициента шума симметрического автодина от уровня ВЧ напряжения на контуре и его добротности

колебаний для асимметричной и симметричной схем автодинных датчиков.

Для достоверности и точности проведения расчетов в математических моделях учтены одинаковые условия генерации для двух типов датчиков. Из приведенных расчётов следует, что общим недостатком обеих схем является ухудшение шумовых характеристик при низких уровнях напряжения генерации (в нашем случае ниже 100 мВ). Тем не менее, с понижением ВЧ – уровня наблюдается интенсивный рост чувствительности спинового детектора. Именно соотношение между этими двумя факторами необходимо учитывать при настройке рабочих режимов автодина.

### Выводы

1. Из полученных результатов следует, что использование симметричного автодина обеспечивает выигрыш в соотношении сигнал/шум и восприимчивости к резонансным сигналам по сравнению с асимметричными одноконтурными схемами. Например для транзисторов BF245C при  $f_0=28$  МГц,  $f_M=100$  Гц,  $Q=200$  и  $E\approx 800$  мВ коэффициент шума для симметричной схемы уменьшился больше чем на 8,5% (до уровня 4,48дБ), а чувствительность увеличилась на 4,7%.

2. Повышение чувствительности симметричных схем позволяет наблюдать меньшие концентрации исследуемых ядер.

**Список литературы:** 1. Яценко А. В. Датчик сигналов ЯМР для исследования веществ с большим значением T1. / А. В. Яценко, С. В. Евдокимов // ПТЭ. - 2003. - № 1. - С. 64-66. 2. Stoican O. S. NQR Detection Setup. / O. S. Stoican // Romanian Journal of Physics. – 2004. – Vol.51, №1-2. – P. 311-315. 3. Probst P. A. Marginal oscillator optimized for radiofrequency size effect measurements. / P. A. Probst, B. Collet, and W. M. MacInnes // Review of Scientific Instruments. - 1976. – V.47, №12. - P. 107-112. 4. Хандожко А. Г. Автодинный детектор для исследования ядерного магнитного резонанса и размерных эффектов в полупроводниках. / А. Г. Хандожко, Е. И. Слынько, И. П. Черныш // ПТЭ. – 1988. - №5. – С.110-113. 5. Лёше А. Ядерная индукция. / А. Лёше – Москва: ИЛ, 1963. - 684с. 6. Hill H.D.W., Richards R.E. Limits of measurement in magnetic resonance // J. Sci. Instrum. (J. Phys. E.). 1968. V.1. № S.2. P. 977-983. 7. Benedek G.B., Kushida T. Nuclear Magnetic Resonance in Antiferromagnetic MnF<sub>2</sub> under Hydrostatic Pressure // Phys. Rev. 1960. V.118. № 1. P.46-53. 8. Adler Michael S. Sensitivity of Marginal Oscillator Spectrometers. / Michael S. Adler, Stephen D. Senturia, and C. Robert Hewes. // Review of Scientific Instruments. - 1971. - V.42, №5. - P. 704-712. 9. Ядерный магнитный резонанс. Учебное пособие / Под ред. проф. П. М. Бородина, - Л.: издательство ЛГУ, 1982. 334с. 10. [http://www.nxp.com/documents/data\\_sheet/BF245A-B-C.pdf](http://www.nxp.com/documents/data_sheet/BF245A-B-C.pdf) 11. Bloyet D. Very low noise amplifier for low temperature pulsed NMR experiments. / D. Bloyet, J. Lepaisant, and E. Varoquaux. // Review of Scientific Instruments. - 1985. - V.56, №9. - P. 1763-1771. 12. Салливан Н. Применение полевых транзисторов в ЯМР- и ЯКР-спектрометрах / Н. Салливан // Приборы для научных исследований. – 1973. - №3. – С. 56-59.

Надійшла до редколегії 20.12.2012

УДК 621.373.52:539.1.078

**Анализ шумовых характеристик автодинного спин-детектора Политанский Л. Ф., Самила А. П., Хандожко В. А.** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХПІ», – 2012. - № 68 (974). – С. 104-110. – Бібліогр.: 12 назв.

На основі малосигнальних еквівалентних схем проведена аналітична оцінка коефіцієнта шуму і чутливості асиметричного та симетричного автодинних спинових детекторів. Показано, що при однакових умовах високочастотної генерації коефіцієнт шуму для симетричної схеми зменшується приблизно на 8,5%, а чутливість зростає на 4,7% в порівнянні з асиметричною схемою. Досліджено залежність коефіцієнта шуму (КШ) симетричного автодину від рівня високочастотної напруги на коливальному контурі (E) і його добротності (Q).

**Ключові слова:** автодин, коефіцієнт шуму, ядерна сприйнятливність, спектральна густина шуму, малосигнальна еквівалентна схема.

Based on the small-signal equivalent circuits, an analytical estimation of the noise factor and sensitivity of the asymmetric and symmetric marginal oscillators has been made. It is shown that under the identical high-frequency generation conditions the noise factor for the symmetric circuit is reduced by about 8,5%, and the sensitivity is increased by 4,7% as compared to the asymmetric circuit. The noise factor ( $N_F$ ) of the

symmetric marginal oscillator has been studied as a function of high-frequency voltage level in the oscillating loop ( $E$ ) and its quality factor ( $Q$ ).

**Keywords:** marginal oscillator, noise factor, nuclear sensitivity, noise spectral density, small signal equivalent circuit.

УДК 519.876.5

*В. А. СПЕРАНСКИЙ*, ст. препод., ОНПУ, Одесса

## **ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ В ВИДЕ РЯДОВ ВОЛЬТЕРРА В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ**

Предлагается программно-аппаратный комплекс идентификации нелинейных динамических объектов на основе моделей Вольтерра в частотной области с использованием полигармонических тестовых сигналов. Применение метода и инструментальных средств демонстрируется на примере построения модели канала связи.

**Ключевые слова:** нелинейные системы, ряды Вольтерра, идентификация, полигармонические сигналы, многомерные частотные характеристики, инструментальные средства идентификации.

### **Введение**

Большинство технических систем и объектов живой природы имеют сложную структуру и обладают одновременно нелинейными и динамическими свойствами. Основным и одним из наиболее эффективных методов исследований таких систем в большинстве случаев является моделирование. На современном этапе развития техники в целом и информационных технологий в частности, использование вычислительной техники в процессе моделирования является обязательным фактором, позволяющим решать высокеемкие задачи с точки зрения вычислительной нагрузки. Эффективные алгоритмы и программные средства позволяют решать задачи моделирования с максимальной производительностью и высокой степенью адекватности получаемых результатов.

Для идентификации нелинейных динамических систем широко используются модели в виде интегро-степенных рядов Вольтерра [1–4]. При этом нелинейные и динамические свойства системы полностью характеризуются последовательностью многомерных весовых функций – ядер Вольтерра (ЯВ).

### **Целью работы**

Целью работы является разработка инструментальных средств идентификации нелинейных систем с помощью рядов Вольтерра в частотной области с использованием полигармонических тестовых сигналов и исследование эффективности разработанных средств на практическом примере построения нелинейной динамической модели для канала связи.

### **Методика экспериментальных исследований**

Задача идентификации при моделировании нелинейной динамической системы в виде ряда Вольтерра заключается в определении многомерных весовых функций  $w_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)$ ,  $n = 1, 2, \dots$  – ядер Вольтерра или передаточных функций  $W_n(j\omega_1, j\omega_2, \dots, j\omega_n)$  – Фурье-образов ядер на основе данных экспериментальных исследований системы «вход–выход». Идентификация нелинейной системы в частотной области сводится к определению на заданных частотах значений модуля и фазы многомерной передаточной функции  $W_n(j\omega_1, j\omega_2, \dots, j\omega_n)$  – многомерных АЧХ  $|W_n(j\omega_1, j\omega_2, \dots, j\omega_n)|$  и ФЧХ  $\arg W_n(j\omega_1, j\omega_2, \dots, j\omega_n)$ .

Тестовые полигармонические воздействия, представляют собой сигналы вида

© В. А. СПЕРАНСКИЙ, 2012