



УДК 621.317  
ББК 22.3

## ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ МОЩНОСТИ ШУМА ДВУХПОЛЮСНИКОВ

*С.А. Судоргин*

Разработан прибор на базе микроконтроллера для измерения спектральной плотности мощности шума двухполюсников. Приведены структурная схема, алгоритм работы и конструкция прибора. Измерены характеристики устройства: спектральная плотность мощности шума АЦП-микроконтроллера для различных случаев. Также были измерены шумовые характеристики усилителя в трех случаях: для усилителя без экранирующего корпуса, для заэкранированного усилителя без отдельного питания и с отдельным питанием измерительной и основной плат. Проведена серия измерений спектральной плотности мощности шума резисторов различных номиналов несколькими методами. Разработана программа для авторегрессионной оценки спектральной плотности мощности шума и проведен анализ ее работы для различных значений порядка авторегрессии.

*Ключевые слова:* двухполюсники, спектральная плотность мощности (СПМ), шумовые характеристики, классические методы оценивания СПМ, авторегрессионный метод оценивания СПМ.

### Введение

Наряду с полезными информационными составляющими в реальных сигналах присутствуют помехи и шумы. К помехам обычно относят сигналы от посторонних источников, наводки аппаратуры, влияние дестабилизирующих факторов на основной сигнал и т. п. Физическая природа помех, как правило, не случайна, и после соответствующего изучения помеха может переводиться в разряд детерминированной или исключаться из сигнала [1]. К шумам относят случайные флуктуации сигнала, обусловленные природой его источника или устройств детектирования и формирования сигнала. Решение таких задач, как обнаружение, распознавание и измерение параметров сигнала всегда затрудняется наличием помех искусственного или естественного происхождения. В любой области электронной техники значение предельно различимого слабого сигнала определяется отношением сигнал/шум. Отношение сигнал/шум, равное единице, соответствует порогу обнаружения полезного сигнала в его смеси с шумом. Даже если измеряемая величина не мала, шум снижает точность измерения. Устранение и минимизация шумов в проектируемых схемах и системах – одна из наиболее трудных инженерных задач. Общих правил для этого не существует, поэтому приходится многие решения проверять опытным путем, что требует значительных временных затрат [5]. Одной из важнейших характеристик шумового сигнала является его спектральная плотность мощности.

### Описание прибора

Прибор для измерения спектральной плотности мощности шума двухполюсников собран на базе микроконтроллера AduC847. Шумовой сигнал с двухполюсника подается на вход малошумящего инструментального усилителя. Использование инструментального усилителя с хороши-

ми характеристиками необходимо для обеспечения стабильного коэффициента усиления и малого уровня собственных шумов. Усиленный сигнал поступает в микроконтроллер. Для измерения шумового напряжения различной полярности к контроллеру подключен источник опорного напряжения. Оцифровка шумового сигнала происходит с помощью встроенного 24-разрядного АЦП-микроконтроллера. АЦП способен работать в двуполярном режиме, имеет диапазон входных напряжений  $\pm 2,5$  В. Кнопка управления устройством выведена на переднюю панель. Результаты, полученные устройством, передаются напрямую из микроконтроллера через USB-порт в компьютер, где обрабатываются программами для вычисления спектральной плотности мощности шума. Структурная схема прибора показана на рисунке 1.

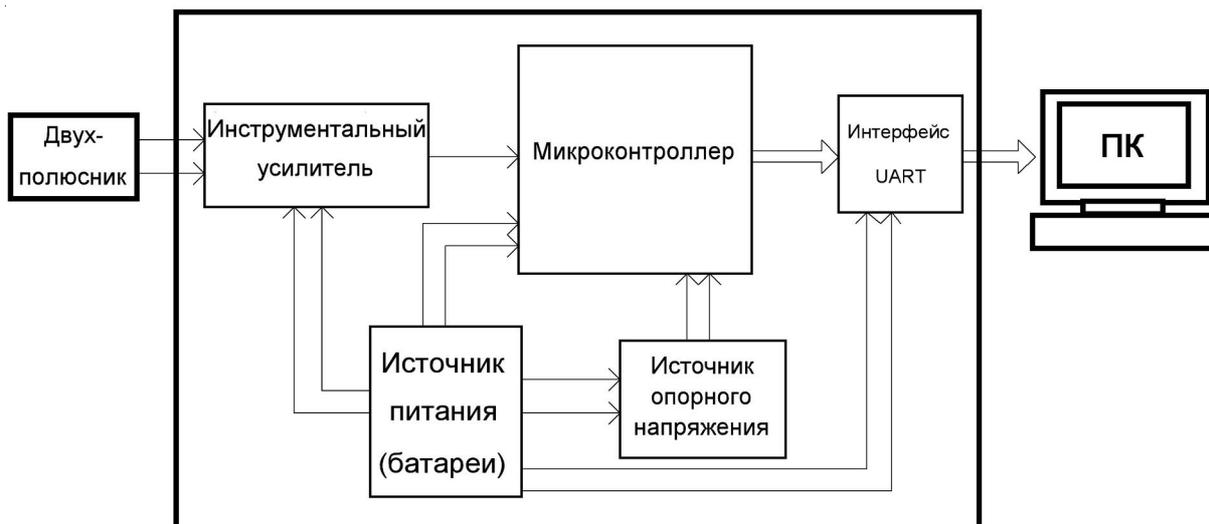


Рис. 1. Структурная схема прибора для измерения СПМ шума

Измерительная часть представляет собой малошумящий инструментальный усилитель. Его собственные шумы на частоте 10 Гц составляют  $2 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ ; а на частоте 100 Гц –  $1,2 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ . Коэффициент усиления рассчитывается по формуле:

$$G = 1 + \frac{6000}{R_G}, \quad (1)$$

где  $R_G$  – сопротивление резистора в Омах, задающего коэффициент усиления. Для данной схемы  $R_G = 51,1 \text{ Ом}$  и, соответственно,  $G = 118$ .

Питание устройства осуществляется от трех блоков аккумуляторов, два блока вырабатывают напряжение «+5 В», один – «-5 В». Напряжения «+5 В» и «-5 В» необходимы для питания измерительной схемы.

Для получения отсчетов случайного сигнала используется программа «HyperTerminal». Создается файл с разрешением .txt, в который записываются отсчеты шумового напряжения, количество выборок сигнала, количество отсчетов в одной выборке, шаг дискретизации по времени, коэффициент усиления внутреннего усилителя микроконтроллера и выборки отсчетов шумового напряжения.

Спектральная плотность мощности шума вычисляется одной из программ. Первая программа производит спектральное оценивание методом периодограмм Уэлча [3]. В ней есть возможность вычисления СПМ с применением различных временных окон: прямоугольного, Бартлетта, Ханна, Хэмминга, Наттола и Гаусса, а также построения графика оценки СПМ [4]. Другая программа вычисляет спектральную плотность мощности методом авторегрессионного моделирования.

### Оценка СПМ шума методом авторегрессии

По полученным экспериментально отсчетам шумового напряжения  $x[n]$  вычисляется их автокорреляционная последовательность  $K_x[m]$ :

$$K_x[m] = \sum_{n=0}^{M-1} x[n+m]x[n], \quad m = 0, \dots, L \leq M, \quad (2)$$

где  $M$  – количество отсчетов в выборке ( $M = 1\,024$ );

$L$  – порядок авторегрессии.

Значения автокорреляционной последовательности  $K_x[m]$  (2) подставляются в систему уравнений Юла-Уолкера [3]:

$$\begin{bmatrix} K_x[0] & K_x[-1] & \dots & K_x[-L] \\ K_x[1] & K_x[0] & & K_x[-L+1] \\ \vdots & & & \vdots \\ K_x[L] & K_x[L-1] & \dots & K_x[0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_u^2 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Методом Гаусса из системы (3) находятся коэффициенты авторегрессии  $a_l$  и дисперсия  $\sigma_u^2$  входного шума. Затем находим спектральную плотность мощности шума  $G_{AP}(f)$ .

$$G_{AP}(f) = \frac{\Delta t \sigma_u^2}{\left| 1 + \sum_{l=1}^L a_l e^{-jfl\Delta t/2\pi} \right|^2}. \quad (4)$$

По полученным данным строится график зависимости СПМ от частоты (4). Результаты оценки СПМ шума АЦП-микроконтроллера для трех значений порядка авторегрессии ( $L = 10; 25; 50$ ) представлены на рисунке 2.

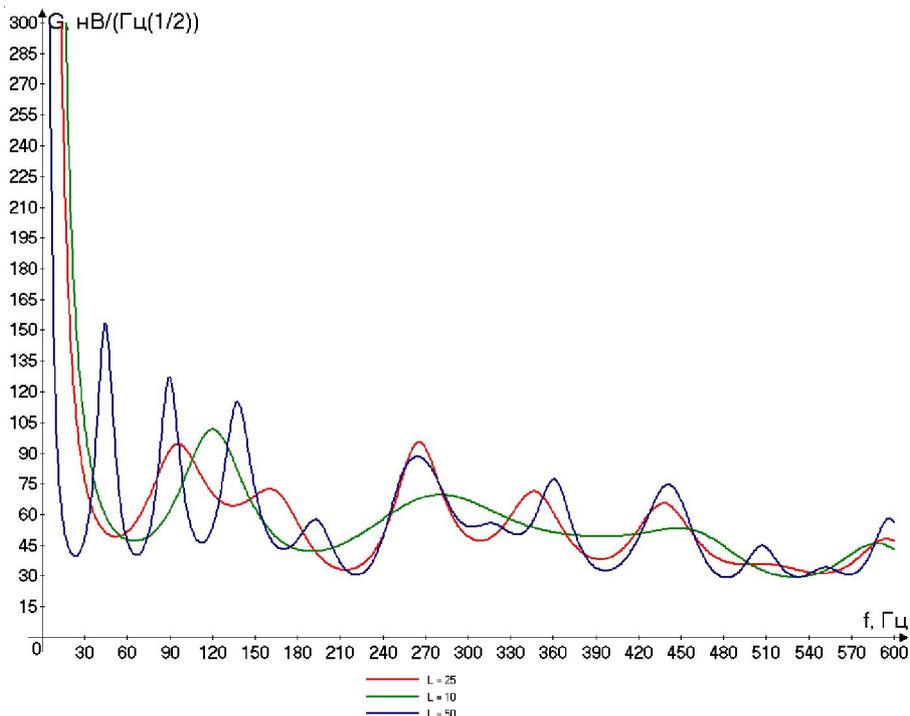


Рис. 2. Оценки СПМ шума для различных порядков авторегрессии

Данные оценки спектральной плотности мощности имеют характерные для авторегрессионного метода острые пики и более плавные впадины. При работе с методом авторегрессии необходимо учитывать, что задание слишком малой величины порядка авторегрессии  $L$  ведет к тому, что характерные спектральные пики сглаживаются и можно не заметить различных особенностей спектра. А задание величины  $L$  слишком большой, наоборот, приводит к образованию «ложных» пиков, чего необходимо избегать, чтобы оценка спектра была состоятельной. Отсюда можно сделать вывод, что величину порядка авторегрессии необходимо подбирать опытным путем для каждого конкретного случая.

### Измерение шумовых характеристик прибора

Серьезную проблему в работе составляли собственные шумы прибора. Для этого был произведен целый ряд экспериментов по нахождению оптимальной разводки печатных плат прибора, точек соединения экранов и земель.

Сначала измерялись собственные шумы АЦП-микроконтроллера. Прибор соединялся с компьютером через интерфейс UART. В случае если от АЦП получен отсчет, возникает аппаратное прерывание. Результат преобразуется к значению напряжения во внешней цепи по формуле:

$$U = \left( \frac{Code}{2^{N-1}} - 1 \right) \times V, \quad (5)$$

где  $Code$  – код, полученный от АЦП;

$N = 24$  – разрядность АЦП;

$V$  – максимальное напряжение данного диапазона, мкВ. После вычисления напряжения по формуле (5) его значение сохраняется в специальном файле на компьютере.

Оценка спектральной плотности мощности шума, приведенного ко входу микроконтроллера, была получена с применением метода периодограмм Уэлча:

$$G(f) = \frac{\Delta t}{K_u^2 Q E N} \sum_{i=0}^{Q-1} \left| \sum_{n=0}^{N-1} w[n] (x_i[n] - \bar{x}_i) \exp(-j 2\pi f n \Delta t) \right|^2, \quad (6)$$

где  $N$  – количество отсчетов в одной реализации  $x_i[n]$ ;

$Q$  – количество реализаций;

$\Delta t$  – шаг дискретизации по времени;

$K_u$  – коэффициент усиления внутреннего усилителя микроконтроллера;

$w[n]$  – используемое окно данных;

$E$  – энергия этого окна, определяемая:

$$E = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} w^2[n].$$

Шумовая спектральная характеристика  $\sqrt{G(f)}$  (нВ/ $\sqrt{\Gamma_{\text{ц}}}$ ) рассчитывалась на частотах  $f_k = k/(N\Delta t)$ .

Серьезную проблему в работе составляли собственные шумы прибора. Для этого был произведен целый ряд экспериментов по нахождению оптимальной разводки печатных плат прибора, точек соединения экранов и земель. Оценка СПМ АЦП-микроконтроллера для окончательного варианта платы представлена на рисунке 2, а. Авторегрессионная оценка для порядка модели  $L = 15$  приведена на рисунке 2, б. Она имеет характерные для метода авторегрессии острые спектральные пики и более пологие впадины.

Оценка СПМ шума усилителя показана на рисунке 3, *а*. Уровень собственных шумов составляет 6–8 нВ/ $\sqrt{\Gamma\text{ц}}$ . Авторегрессионная оценка для порядка модели  $L = 10$  приведена на рисунке 3, *б*.

Следующим шагом было измерение шумов усилителя. Оценка СПМ шума усилителя показана на рисунке 3.

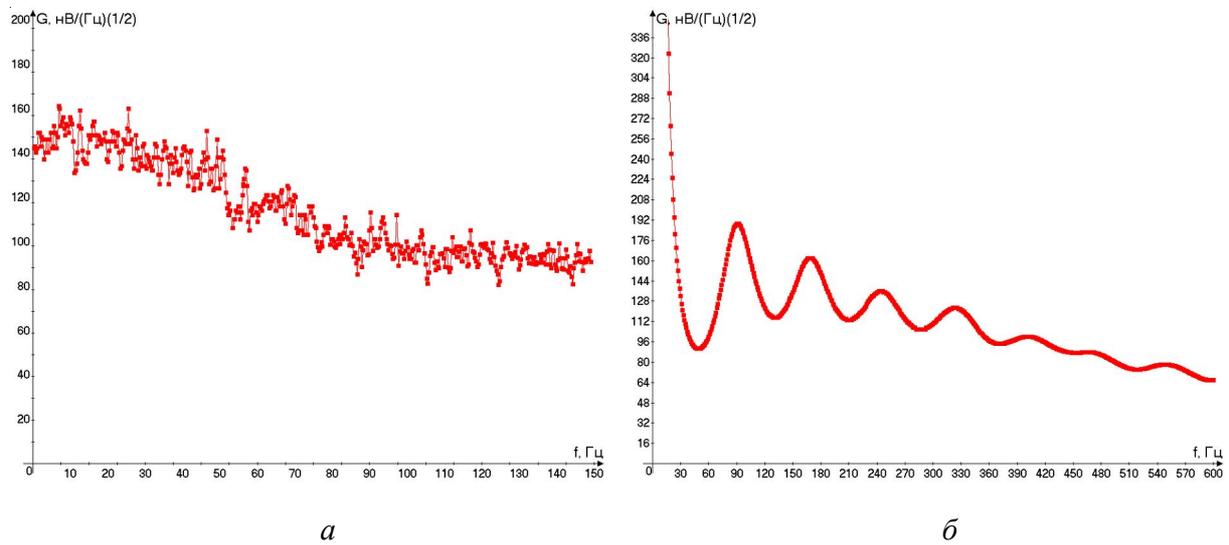


Рис. 2. Оценка СПМ АЦП-микроконтроллера в экране:  
*а* – методом периодограмм Уэлча; *б* – методом авторегрессии ( $L = 15$ )

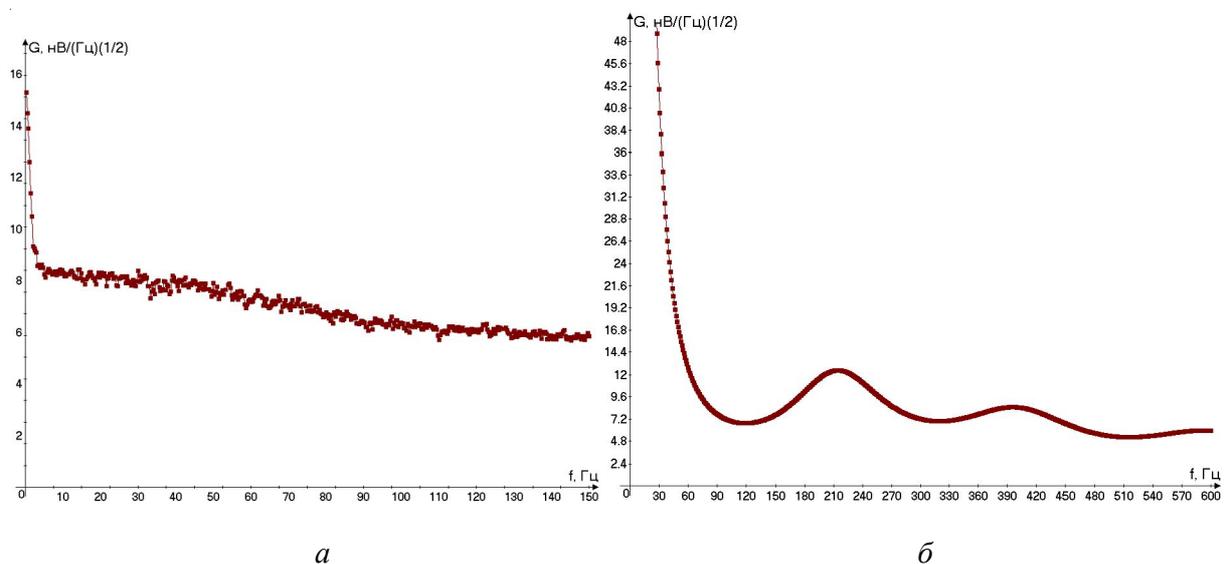


Рис. 3. Оценка СПМ шума усилителя:  
*а* – методом периодограмм Уэлча; *б* – методом авторегрессии ( $L = 10$ )

### Результаты измерения СПМ двухполюсников

В процессе выполнения работы были произведены измерения спектральной плотности мощности шума резисторов различных номиналов (510 КОм, 750 КОм и 1 МОм). Оценки спектральной плотности мощности шума для данных резисторов, выполненные с помощью метода периодограмм Уэлча и метода авторегрессии, представлены на рисунках 4–6.

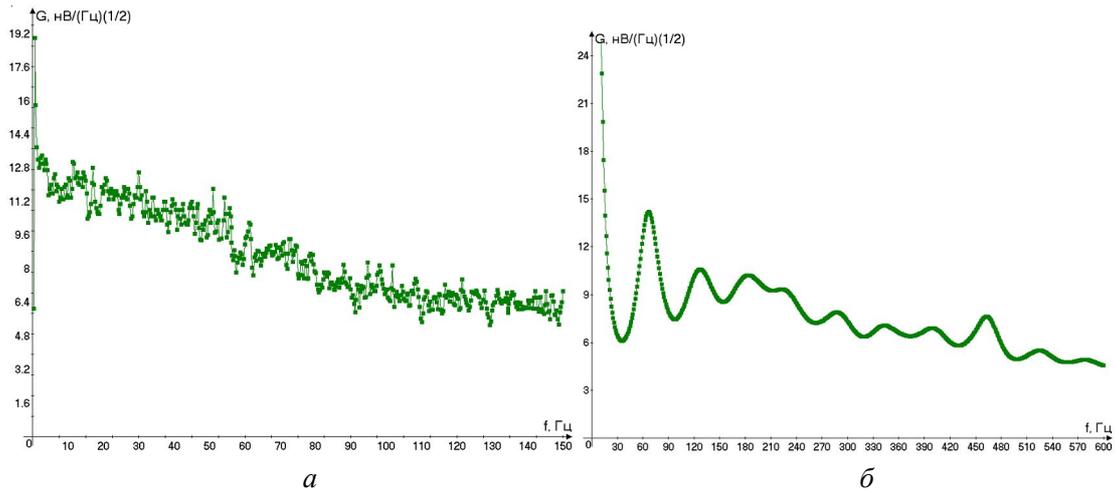


Рис. 4. Оценка СПМ шума для резистора  $R = 510$  КОм:  
 $a$  – методом периодограмм Уэлча;  $b$  – методом авторегрессии ( $L = 20$ )

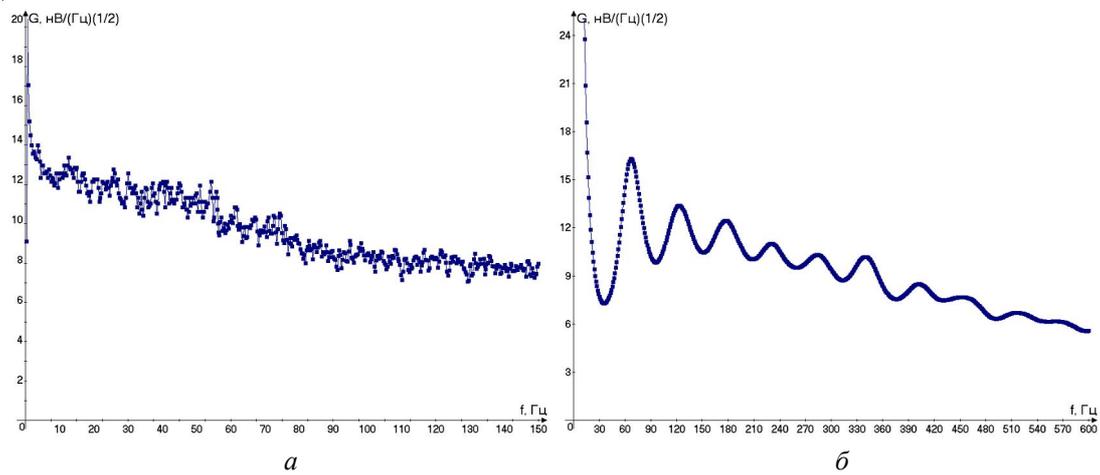


Рис. 5. Оценка СПМ шума для резистора  $R = 750$  КОм:  
 $a$  – методом периодограмм Уэлча;  $b$  – методом авторегрессии ( $L = 20$ )

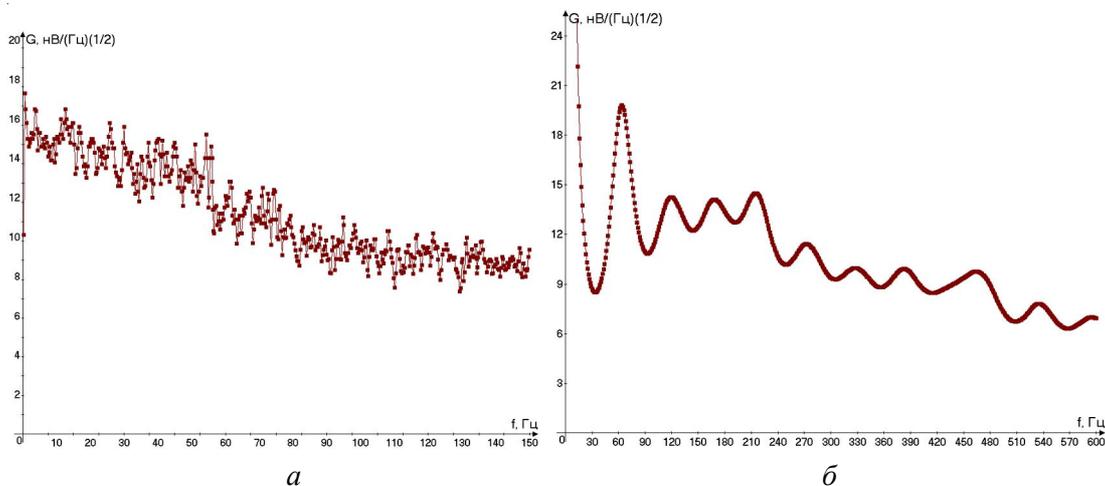


Рис. 6. Оценка СПМ шума для резистора  $R = 1$  МОм:  
 $a$  – методом периодограмм Уэлча;  $b$  – методом авторегрессии ( $L = 20$ )

Из анализа графиков видно, что вычисленные обоими методами значения спектральной плотности мощности шума для резисторов несколько выше теоретических значений, рассчитываемых по формуле Найквиста. Для  $R = 510$  КОм теоретическое значение:  $G_T = 2,53$  нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ ; для  $R = 750$  КОм:  $G_T = 3,73$  нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ ; для  $R = 1$  МОм:  $G_T = 4,97$  нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ . Измеренные значения СПМ составили: для  $R = 510$  КОм:  $G \sim 2-4$  нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ ; для  $R = 750$  КОм:  $G \sim 3-5$  нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ ; для  $R = 1$  МОм:  $G \sim 4-7$  нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ . Это обусловлено достаточно высокими собственными шумами АЦП-микроконтроллера и усилителя. По данным производителя, шум инструментального усилителя INA163 составляет 1–3 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ , что выше теоретических значений СПМ шума для некоторых резисторов. К сожалению, найти усилитель с более хорошими характеристиками не удалось, но надо отметить, что усилитель на базе микросхемы INA163 является одним из наиболее низкошумящих усилителей, выпускаемых в настоящее время. В перспективе необходимо различными способами уменьшить собственные шумы прибора при помощи изменения разводки плат, а также применения различных вариантов экранировки. Также можно попробовать уменьшить шумы, применив экранирующий корпус с более толстыми стенками.

### Заключение

Изготовлен прибор для измерения спектральной плотности мощности шума двухполюсников. Измерены его характеристики, а именно, спектральная плотность мощности шума АЦП-микроконтроллера, шумовые характеристики усилителя. Выяснено, что для правильной работы схемы и уменьшения собственных шумов и наводок необходима хорошая экранировка, правильная разводка платы и питание измерительной и основной плат прибора от разных блоков аккумуляторов. Произведена серия измерений спектральной плотности мощности шума для резисторов различных номиналов несколькими методами. Разработана программа для авторегрессионной оценки спектральной плотности мощности шума и проведен анализ ее работы для различных значений порядка авторегрессии. Прибор имеет сравнительно небольшие размеры:  $228 \times 180 \times 50$  мм и невысокую стоимость изготовления, что выгодно отличает его от аналогичных промышленных образцов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники / Л. А. Бессонов. – М. : Высш. шк., 1996. – 344 с.
2. Букингом, М. Шумы в электронных приборах и системах / М. Букингом. – М. : Мир, 1986. – 399 с.
3. Игнатъев, В. К. Отчет о выполнении НИОКР «Разработка опытного образца портативного холловского магнитометра (государственный контракт № 4167р/6542 от 26.06.06) / В. К. Игнатъев. – Волгоград, 2007. – 82 с.
4. Игнатъев, В. К. Статистическая радиофизика : конспект лекций / В. К. Игнатъев. – Волгоград : Изд-во ВолГУ, 2000. – 122 с.
5. Отт, Г. Методы подавления шумов и помех в электронных системах / Г. Отт. – М. : Мир, 1979. – 318 с.

## THE DEVICE FOR MEASUREMENT OF SPECTRAL DENSITY OF CAPACITY OF NOISE TWO-POLARS

*S.A. Sudorgin*

The device for measurement of spectral density of capacity of noise two-polars is developed of the microcontroller. The block diagram, algorithm of operation and design of the device show in the paper. The characteristics of the device are measured: spectral density of capacity of noise of the microcontroller's analog-digital converter for various cases. The noise characteristics of the amplifier were measured in three cases: for the amplifier without the shielding case, for the amplifier in the shielding case without a separate feed and with a separate feed of measuring and basic printed-circuit board. Measurements of spectral density of capacity of noise of resistors of various face values by several methods are shown in this paper. The program for autoregress estimation of spectral density of capacity of noise is developed and analyzed for various orders of autoregression.

**Key words:** *spectral density, electromagnetic noise, autoregression.*