

УДК 621.3.088.7

**АДАПТИВНАЯ ЦИФРОВАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ В ПРИБОРАХ  
СО СВЕРХНИЗКИМ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ**

ПАНФЕРОВ Д.В.

*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики» (ФГУП «ВНИИА»)  
(Москва, Российская Федерация)*

**Аннотация:** Рассматривается способ адаптивной цифровой фильтрации импульсных помех, обеспечивающий быстрый отклик на скачкообразные изменения сигнала. Способ отличается минимальными требованиями к вычислительным ресурсам для обработки измерительного сигнала в приборах со сверхнизким энергопотреблением.

**Ключевые слова:** цифровой фильтр, адаптивный фильтр, цифровая обработка сигналов, импульсные помехи.

**ADAPTIVE DIGITAL FILTERING OF PULSE NOISE IN ULTRA-LOW POWER  
CONSUMPTION DEVICES**

DMITRY V. PANFEROV

*Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Research Institute of Automatics» (FSUE «VNIIA»)  
(Moscow, Russian Federation)*

**Abstract.** A method of adaptive digital filtering of pulse noise which provides a fast response to abrupt changes in the signal is considered. The method is characterized by minimal requirements for computing resource for processing the measurement signal in devices with ultra-low power consumption.

**Keywords:** digital filter, adaptive filter, digital signal processing, pulse noise.

**Введение**

Датчики физических величин, в частности датчики давления, работающие на промышленных объектах, подвержены влиянию сильных электромагнитных помех (ЭМП) высокой энергии, приводящих к искажению измерительного сигнала. Системы контроля и управления (СКУ) для корректной выработки управляющих воздействий должны получать от датчика информацию (измерительный сигнал) с наименьшими искажениями, с максимально возможной скоростью опроса, с наименьшими задержками результата измерения. Максимально возможное быстроедействие датчика при высокой точности измерений в динамическом режиме, как например, в системах обнаружения утечек (СОУ) нефтепроводов [1], важно для обеспечения безопасности эксплуатации оборудования на промышленных объектах. В то же время необходимо отфильтровывать высокоамплитудные импульсные помехи, вызванные различными внешними факторами. Традиционные методы фильтрации, удовлетворяющие указанным противоречивым требованиям, предъявляют высокие требования к вычислительным ресурсам и, соответственно, к энергопотреблению прибора. Этим ограничивается их применение в датчиках со сверхнизким энергопотреблением.

**Метод построения адаптивного фильтра импульсных помех с минимальными  
требованиями к вычислительным ресурсам**

Для фильтрации сигналов применяются цифровые фильтры (ЦФ), математически описываемых разностными уравнениями [2, 3], в которых входная последовательность  $x(n)$  преобразуется в выходную  $y(n)$ :

$$y[n] = \sum_{r=0}^M a_r x[n-r] \pm \sum_{s=1}^N b_s y[n-s], \quad n=0, 1, 2 \dots \quad (1)$$

Целые числа  $M$ ,  $N$ , определяют порядок ЦФ. Весовые коэффициенты  $a_r$  и  $b_s$  однозначно определяют передаточную характеристику фильтра.

По виду разностных уравнений (1) существуют два класса цифровых фильтров [3]: нерекурсивные (НЦФ), в которых выходной параметр  $y(n)$  определяется только значениями входной последовательности; и рекурсивные (РЦФ), в которых выходной параметр  $y(n)$  определяется как текущим значением  $x(n)$ , так и предшествующими значениями входных и выходных последовательностей.

Известно, что при их соизмеримых порядках, а, следовательно, и требованиях к вычислительным ресурсам, РЦФ обладают более высокой эффективностью по сравнению с

НЦФ [2, 3]. Однако при выборе весовых коэффициентов РЦФ необходимо обеспечить условия устойчивости, в отличие от нерекурсивных фильтров, которые устойчивы всегда.

Для получения высокой крутизны области перехода от полосы пропускания к полосе подавления фильтр должен иметь высокий порядок. Соответственно количество вычислительных операций, затрачиваемых на обработку разностного уравнения фильтра, также будет высоким.

В адаптивных цифровых фильтрах весовые коэффициенты разностного уравнения изменяются по определенному закону с целью минимизации нежелательных (шумовых) составляющих обрабатываемого сигнала. Для фильтров высокого порядка требуются значительные ресурсы для вычисления большого количества весовых коэффициентов. Если в качестве основы адаптивного фильтра используется рекурсивный алгоритм, дополнительно возникает необходимость контролировать условия устойчивости фильтра. В связи с этим рекурсивные алгоритмы значительно реже используются для создания адаптивных фильтров. В приборах и системах со сверхнизким энергопотреблением реализация сложных алгоритмов фильтрации сигналов приводит либо к увеличению длительности цикла обработки информации, либо к увеличению энергопотребления при сохранении необходимой длительности цикла. Оба этих следствия приводят к ограничению возможностей цифровой адаптивной фильтрации сигналов в системах с автономным питанием с длительным периодом автономности, а также в датчиках с питанием от токовой петли 4-20 мА, предназначенных для выполнения задач с быстрой реакцией на аварийные события. Предельным упрощением цифрового фильтра, определяемого разностным уравнением (1), является рекурсивный фильтр 1-го порядка, описываемый в общем виде разностным уравнением:

$$y[n] = a_0 * x[n] + a_1 * x[n - 1] - b_1 * y[n - 1] \quad (2)$$

и простым условием устойчивости [4]:

$$|b_1| < 1. \quad (3)$$

Комплексная передаточная функция рекурсивного цифрового фильтра нижних частот (РЦФ НЧ) от комплексной переменной  $z$  представляется выражением [4]:

$$H(z) = \frac{a_0}{1 + b_1 * z^{-1}}, \quad (4)$$

$$z = e^{j\omega T}, \quad (5)$$

где  $\omega$  – частота сигнала,  $T$  – интервал дискретизации.

Функция  $H(z)=H(j\omega T)$  рассматривается на частотном диапазоне  $0 \leq \omega \leq \pi$ . Коэффициенты  $b_1$  и  $a_0$  связаны между собой следующим образом:

$$b_1 = 1 - a_0. \quad (6)$$

Для построения адаптивного фильтра на базе РЦФ 1-го порядка, требующего минимума вычислительных операций, необходимо изменять коэффициенты  $a_0$  и  $b_1$  по определенному закону, позволяющему минимизировать нежелательные составляющие в информационном сигнале. Нахождение эффективного и столь же простого алгоритма адаптации позволили бы применять такой фильтр в приборах со сверхнизким энергопотреблением без заметного снижения быстродействия и без увеличения энергопотребления.

Импульсные помехи, присутствующие в информационном сигнале, имеют высокое значение первой производной. Вычисляя значение первой производной или скорости изменения сигнала на каждой текущей выборке сигнала, и изменяя пропорционально модулю этой величины значение весового коэффициента рекурсивного цифрового фильтра нижних частот, получаем адаптивный фильтр. При этом для того чтобы снизить чрезмерно высокую чувствительность к пульсациям сигнала с низкой амплитудой, при обработке необходимо применить небольшое время релаксации фильтра. В результате вычисление скорости изменения сигнала с внесением времени релаксации сводится к построению алгоритма рекурсивного цифрового фильтра верхних частот (РЦФ ВЧ). А алгоритм всей адаптивной фильтрации сводится к построению двух рекурсивных цифровых фильтров 1-го порядка, причем коэффициент основного – РЦФ НЧ – пропорционально зависит через масштабирующий коэффициент  $Ka$  от модуля выходного сигнала второго – РЦФ ВЧ, выполняющего роль алгоритма адаптации.

Комплексная передаточная функция РЦФ ВЧ:

$$H_h(z) = \frac{a_{h0} + a_{h1} * z^{-1}}{1 + b_{h1} * z^{-1}}. \quad (7)$$

Тогда весовые коэффициенты РЦФ НЧ с учетом масштабирующего коэффициента  $K_a$  будут определяться модулем функции  $H_h(z)$ :

$$k_{b1}(z) = K_a * |H_h(z)|, \quad (8)$$

$$k_{a0}(z) = 1 - k_{b1}(z). \quad (9)$$

А комплексная передаточная функция всего адаптивного фильтра будет:

$$H_{adp}(z) = \frac{k_{a0}(z)}{1 + k_{b1}(z) * z^{-1}} = \frac{k_{a0}(j\omega T)}{1 + k_{b1}(j\omega T) * e^{-j\omega T}}. \quad (10)$$

При установившейся или медленно изменяющейся величине входного сигнала ( $\omega \rightarrow 0$ ), значение передаточная функция  $H_{adp}(z)$  имеет максимально широкую полосу пропускания. При наличии импульсных помех в обрабатываемом сигнале, имеющих, как известно, в своем спектре преобладание верхних частот, частота среза РЦФ НЧ, определяемого передаточной функцией  $H_{adp}(z)$ , уменьшается, что приводит к подавлению импульсной помехи.

Анализ выражения (10) с учетом (7-9) выявляет уникальные свойства полученного адаптивного фильтра. При действительном скачкообразном изменении обрабатываемого сигнала с одного установившегося состояния в другое установившееся состояние адаптивный фильтр, построенный на основе рекурсивного алгоритма, т.е. имеющий бесконечную импульсную характеристику (БИХ), показывает свойства фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ). В результате переходной процесс занимает значительно меньшее время по сравнению с обработкой традиционными рекурсивными алгоритмами.

Для ускорения работы в приборах со сверхнизким энергопотреблением в выражениях рекурсивных цифровых фильтров могут использоваться целочисленные вычисления с использованием коэффициента демпфирования  $Kd(z)$ :

$$k_{a0}(z) = \frac{1}{Kd(z)}, k_{b1}(z) = -\frac{Kd(z)-1}{Kd(z)}, |Kd(z)| \geq 1. \quad (11)$$

Представление РЦФ НЧ во временной области в этом случае будет:

$$y[n] = \frac{x[n] + y[n-1] * (Kd[n]-1)}{Kd[n]}, \quad (12)$$

где  $x[n]$  – дискретная выборка входного сигнала в дискретный момент времени  $n$ ;  $y[n]$  – значение выходного сигнала в дискретный момент времени  $n$ . Такая же замена может быть выполнена и для РЦФ ВЧ, где выходным сигналом будет величина, пропорциональная скорости изменения входного сигнала  $x'[n]$ .

Структурная схема адаптивного фильтра на основе рассматриваемого метода адаптивной фильтрации представлена на рис. 1.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 2а показана переходная характеристика рассматриваемого адаптивного фильтра. Как было показано выше, она имеет характер конечную длительность, хотя в основе алгоритма адаптивной фильтрации заложен фильтр с бесконечной импульсной характеристикой.

Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ) рассматриваемого адаптивного фильтра для синусоидального сигнала, показанная на рис. 3, демонстрирует свойства традиционного РЦФ НЧ. При этом несмотря на то, что фильтр построен на основе РЦФ 1-го порядка, он показывает крутизну переходной зоны между полосой пропускания и полосой задерживания эквивалентную РЦФ 2-го порядка (наклон до 38 дБ/дек).

Способность рассматриваемого адаптивного фильтра подавлять импульсные помехи представлена коэффициентом подавления  $K_p$ . Исходя из принципа работы данного фильтра, коэффициент подавления увеличивается в зависимости от следующих факторов: с увеличением амплитуды импульсной помехи, с увеличением масштабирующего коэффициента  $K_a$ , с уменьшением частоты среза РЦФ ВЧ  $\omega_{nc}$ . В практических случаях коэффициент подавления импульсных помех может достигать значений 55-57 дБ (рис. 4).

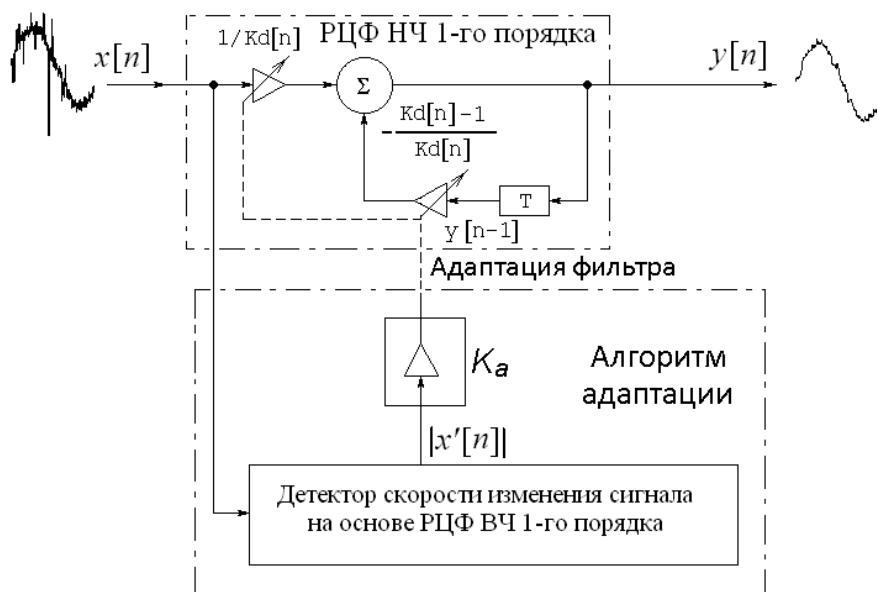


Рис. 1. Структурная схема цифрового фильтра с адаптацией по скорости изменения сигнала

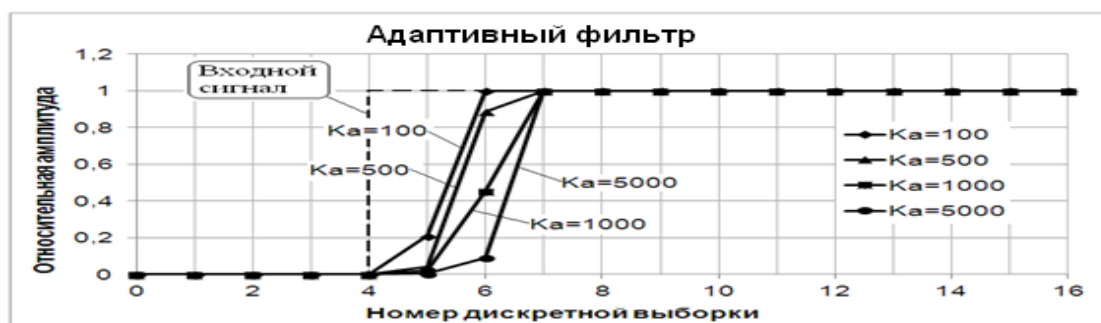


Рис. 2. Переходная характеристика адаптивного фильтра

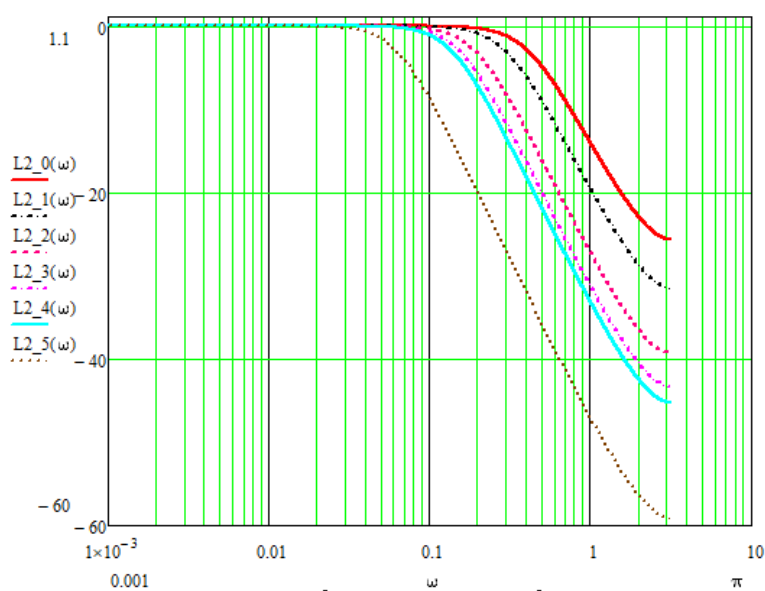
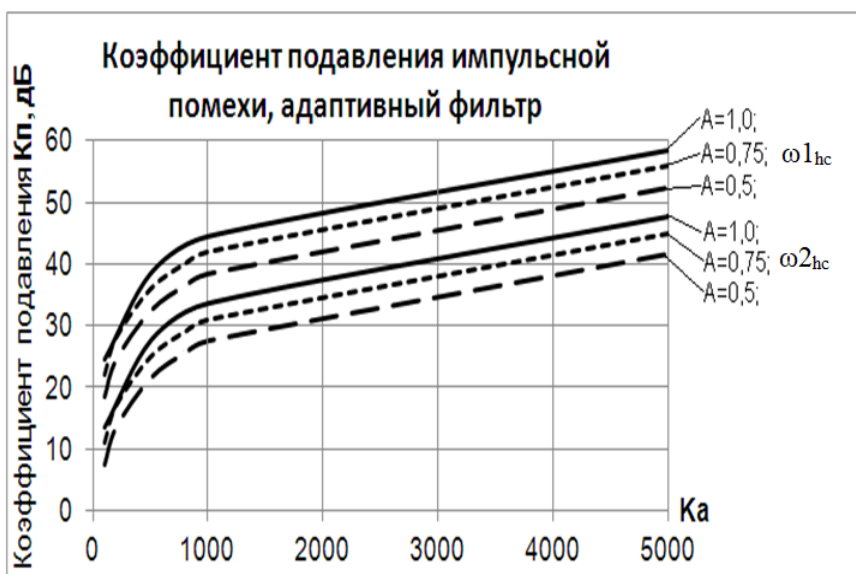
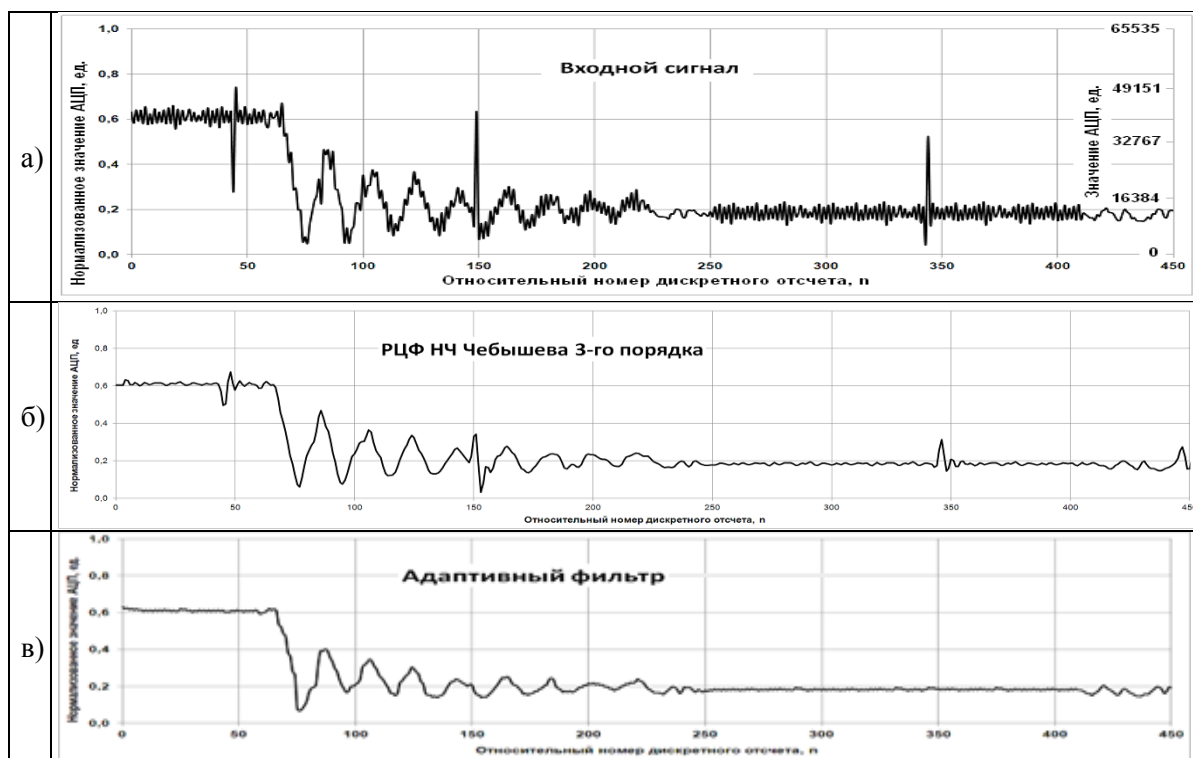


Рис. 3. ЛАЧХ адаптивного фильтра при различных фиксированных параметрах масштабирующего коэффициента  $K_a$



**Рис. 4.** Зависимость коэффициента подавления импульсной помехи с величиной относительной амплитуды 100, 75 и 50 % ( $A=1,0$ ;  $A=0,75$  и  $A=0,5$ ) от масштабирующего коэффициента  $Ka$  при различных частотах среза РЦФ ВЧ ( $\omega_{1hc} < \omega_{2hc}$ )

На рис. 5 показаны диаграммы реального измерительного сигнала, полученного из системы обнаружения утечек нефтепроводов, и результаты его обработки новым цифровым адаптивным фильтром в сравнении с традиционными РЦФ НЧ 3-го порядка. Разработанный адаптивный фильтр обеспечивает более точную передачу формы сигнала (колебательный процесс после фронта падения давления) по сравнению традиционными РЦФ НЧ, искажающими переходный процесс.



**Рис. 5.** Обработка реального зашумленного сигнала адаптивным фильтром: исходный сигнал (а); результаты обработки этого сигнала: РЦФ 3-го порядка (б, в), адаптивным фильтром (г)

Новизна предложенного решения заключается в разработке алгоритма адаптации, основанного на детектировании скорости изменения обрабатываемого сигнала, управляющего коэффициентами простого РЦФ НЧ 1-го порядка, позволившее при минимальных вычислительных ресурсах обеспечить высокоэффективное подавление (в практических применениях до 55...57 дБ) импульсных помех, в т.ч. высокоамплитудных, при максимальном сохранении формы сигнала, и минимизацию времени отклика при скачкообразных изменениях.

### Заключение

Фильтр, выполненный на основе предложенного метода адаптивной фильтрации позволяет получить свойства, трудно достижимые при ограничении вычислительных ресурсов без существенного увеличения времени вычислений и использовании известных способов фильтрации:

а) обеспечивает высокую крутизну перехода от полосы пропускания к полосе задерживания (для синусоидального сигнала), сопоставимую с характеристиками рекурсивных фильтров 2-го или 3-го порядков;

б) несмотря на то, что адаптивный фильтр построен на основе рекурсивного фильтра, он имеет конечную импульсную характеристику;

в) обеспечивает время установления выходного сигнала, меньшее времени установления традиционных рекурсивных фильтров; выходной сигнал имеет конечный переходный процесс;

г) обеспечивает высокую степень подавления высокоамплитудных импульсных помех (на практике от 13 до 57 дБ), превосходящую по эффективности РЦФ высоких (выше 3-го) порядков; при этом степень подавления импульсных помех увеличивается с ростом их амплитуды;

д) требует минимальные вычислительные ресурсы, сопоставимые с РЦФ 2-го или 3-го порядка.

Программный фильтр, основанный на рассмотренном методе адаптивной фильтрации, внедрен в изделия, выпускаемые ФГУП «ВНИИА» для нефтегазовой промышленности.

На исполняемый код программы цифрового адаптивного фильтра получено свидетельство РОСПАТЕНТА о государственной регистрации программ для ЭВМ №2016661563 [5]. Подана заявка на изобретение в Европейско-Азиатское патентное ведомство [6], которая прошла экспертизу и находится на стадии рассмотрения по существу.

### Список использованной литературы

1. Латыпов А.Ф., Князев А.А., Ковшов В.Д. О применении цифровых датчиков давления в системах обнаружения утечек. // Нефтегазовое дело, 2010. <http://www.ogbus.ru>
2. Li Tan. Digital Signal Processing. Fundamentals and Applications.: DeVry University Decatur, Georgia. Elsevier Inc., 2008.
3. Хемминг Р.В. Цифровые фильтры. Пер. с англ./ Под ред. А.М. Трахтмана. М.: Сов. Радио, 1980. – 224с., ил.
4. Гетманов В.Г. Цифровая обработка сигналов. М.: МИФИ, 1997. – 128 с.
5. Панферов Д.В. Цифровой адаптивный фильтр сигналов сенсора давления ADAPT\_FILT. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016661563. 13 октября 2016 г.
6. Панферов Д.В. Способ адаптивной цифровой фильтрации импульсных помех и фильтр для его реализации. Уведомление о получении евразийской заявки. Федеральный институт промышленной собственности (ФИПС). Номер регистрации 2017000154. Дата подачи 25 декабря 2017 г.