

9. Кавун, С. В. Інформаційна безпека [Текст] : підручник / С. В. Кавун. – Харків : Вид. ХНЕУ, 2009. – 368 с.
10. Кавун, С. В. Механизм оценивания экономической эффективности системы экономической безопасности [Текст] / С. В. Кавун // Бизнес-информ. – 2009. – № 8. – С. 58-64.
11. Кавун, С. В. Класифікатор видів інформації та форм документів [Текст] / С.В. Кавун // Науковий вісник Полтавського університету споживчої кооперації України. Сер. Економічні науки: наук. журнал. – Полтава : РВВ ПУСКУ, 2009. – № 5(36). – С. 69-75.
12. Грибунин, В. Г. Комплексная система защиты информации на предприятии [Текст] : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / В. Г. Грибунин, В. В. Чудовский. – М. : Изд. центр „Академия”, 2009. – 416 с.
13. Корченко, О. Г. Системи захисту інформації [Текст] : монографія / О. Г. Корченко. – К. : НАУ, 2004. – 264 с.
14. Фролов, Л. В. Базы данных в Интернете [Текст] : практическое руководство по созданию Web-приложений с базами данных / Л. В. Фролов, Г. В. Фролов. – 2-ое изд., испр. – М. : Издательско-торговый дом „Русская редакция”, 2000. – 448 с.
15. Троелсен, Э. С. и платформа. NET 3.0 [Текст] / Э. Троелсен. – 1-ое изд. – СПб. : Издательский дом „Питер”, 2008. – 1456 с.

УДК 519.688

ПРОГРАММНЫЙ КОМПОНЕНТ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ IFFT-NOISE GATE

Е. В. Семенов
Аспирант*

E-mail: j.semenov@mail.ru

В. В. Шведова

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: shvedova_victoria@ukr.net

*Кафедра информационно-измерительной техники

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт»

пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

Запропоновано алгоритм цифрової фільтрації корисних сигналів різних форм від шумових складових з використанням прямого та зворотного FFT-перетворення. На основі запропонованого алгоритму розроблено програмний компонент для обробки цифрових сигналів «iFFT- Noise Gate»; наведено результати моделювання процесу фільтрації шумів та порівняльну характеристику шумознижуючих властивостей нового алгоритму та відомих аналогів за найбільш суттєвими параметрами: THD, SINAD, SNR

Ключові слова: подавлення шуму, фільтрація, цифрова обробка сигналів, спектр, алгоритм, програмне забезпечення

Предложен алгоритм цифровой фильтрации полезных сигналов разной формы от шумовых составляющих с использованием прямого и обратного FFT-преобразования. На основе предложенного алгоритма разработан программный компонент для обработки цифровых сигналов «iFFT- Noise Gate»; приведены результаты моделирования процесса фильтрации шумов и сравнительную характеристику шумоподавляющих свойств нового алгоритма и известных аналогов по наиболее существенным параметрам: THD, SINAD, SNR

Ключевые слова: подавление шума, фильтрация, цифровая обработка сигналов, спектр, алгоритм, программное обеспечение

1. Введение

В наши дни цифровая фильтрация приобрела широкую популярность в связи с широким использованием микроконтроллеров в разных сферах человеческой деятельности.

Очевидно и преимущество применения цифровой обработки сигнала наряду с аналоговым: улучшается помехозащищенность канала связи, бесконечные возможности кодирования информации [1]. Применение микропроцессоров в радиотехнических системах существенно улучшает их массогабаритные, технические и экономические показатели, открывает

широкие возможности реализации сложных алгоритмов цифровой обработки сигналов. В состав современных вычислительных устройств, обрабатывающих информацию технологических процессов, часто входят блоки программно или аппаратно реализованных цифровых фильтров (ЦФ). По сравнению с аналоговыми фильтрами они предпочтительны во множестве областей (например, сжатие данных, биомедицинская обработка сигналов, обработка речи, обработка изображений, передача данных, цифровое аудио, телефонное эхо подавление) [2], так как обладают рядом преимуществ и недостатков, часть из которых описана ниже.

Целью данной работы является исследование существующих способов подавления шумов в диапазоне 20 - 22050 Гц и на основе анализов их недостатков разработка алгоритма позволяющего улучшить характеристик подавления шумов, таких как SNR (signal to noise ration), THD (Total Harmonic Distortion), SINAD (Sinusoidal and Noise Amp Distortion) [3].

Научная новизна состоит в разработке модели цифрового фильтра, который отличается от известных тем, что фильтрация происходит при помощи принципиально нового алгоритма разработанного на основе FFT-преобразования. Предложенный метод позволяет существенно повысить тонность фильтрации цифрового сигнала, а так же сохранить неизменными ФЧХ и временные характеристики цифровых сигналов.

2. Анализ литературных данных и постановка задачи

Фильтр — это система или сеть, избирательно меняющая форму сигнала (амплитудно-частотную или фазово-частотную характеристику) [2]. Основными целями фильтрации являются улучшение качества сигнала (например, устранение или снижение помех), извлечение из сигналов информации или разделение нескольких сигналов, объединенных ранее для, например, эффективного использования доступного канала связи [3].

В отличие от цифрового, аналоговый фильтр имеет дело с аналоговым сигналом, его свойства не дискретны [4], соответственно передаточная функция зависит от внутренних свойств составляющих его элементов [5].

Ниже приведены основные недостатки рассматриваемых фильтров:

- Фазовая характеристика БИХ-фильтров не линейна, особенно на краях полос [6];
- Гарантировать устойчивость БИХ-фильтров удается не всегда [7];
- Для реализации фильтров используется ограниченное число битов. Практические последствия этого явления: шум округления и ошибки квантования [8].

Так как цифровой фильтр, как и любой другой фильтр, используется для выделения полезной составляющей сигнала из зашумленного [9], то качество его работы определяется, как способностью снизить уровень шума и минимально исказить АЧХ, ФЧХ. Но существующие аналоги все же искажают эти характеристики, что является недостатком [10].

3. Разработка и описание инструмента “ IFFT-NOISE GATE”

3.1. Теоретические предпосылки для разработки

Традиционно в теории сигналов характеристика того, насколько искажен полезный сигнал шумом, определяется с помощью безразмерной величины, называется соотношение сигнал / шум (SNR, Signal-to-noiseratio). Поэтому при разработке различных методов фильтрации шумов SNR выбирают как базовую величину для определения порога фильтрации [11].

Поскольку порог фильтрации определяется, как правило, по экспериментальным данным, в его оценка сопровождается неопределенностью.

$$\text{Gate} = \text{SNR}_{\text{dB}} \pm \Delta \text{SNR}_{\text{dB}}.$$

Для SNR (в dB) выбираем выражение:

$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 20 \lg \frac{\text{RMS}_s}{\text{RMS}_n},$$

где RMS_s и RMS_n - соответственно среднеквадратическое отклонения сигнала и шума.

Выбрав для исследования синусоидальный сигнал и шум, равномерно распределенный в заданной полосе частот, имеем:

$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 20 \lg \left(\sqrt{\frac{3}{2}} \frac{A_s}{A_n} \right) \approx 20 \lg \frac{A_s}{A_n},$$

где A_s и A_n - соответственно амплитуды сигнала и шума.

Таким образом, точность оценки SNR определяется точностью оценки амплитуды полезного сигнала и шума. Поэтому неопределенность SNR можно оценить по выражению для опосредованного измерения:

$$\Delta \text{SNR}_{\text{dB}} = 1,96 \sqrt{\left(\frac{20}{A_s} \cdot \text{RMS}_s \right)^2 + \left(\frac{20}{A_n} \cdot \text{RMS}_n \right)^2}, \quad P = 0,95.$$

Поскольку на практике сигнал и шум анализируются, как правило, вместе из-за их объективную одно-временное присутствие, то расширенная неопределенность с $P = 0,95$:

$$\Delta \text{SNR}_{\text{dB}} \approx 39,2 \cdot \lg \frac{\text{RMS}_{(s+n)}}{A_s},$$

где $\text{RMS}_{(s+n)}$ - среднеквадратическое отклонение экспериментального сигнала содержит как полезную составляющую, так и шум.

В последней формуле использовано нормирования к амплитуде полезного сигнала. Это делает формулу для оценки порога фильтрации инвариантной к уровню сигнала, подлежащего обработке. Таким образом:

$$\text{Gate} = 20 \lg \frac{A_s}{A_n} \pm 39,2 \cdot \lg \frac{\text{RMS}_{(s+n)}}{A_s}. \quad (1)$$

Полученное выражение позволяет повысить качеством разрабатываемых методов фильтрации сигналов за счет повышения точности оценки порога фильтрации [11].

3.2. Описание структурой схемы и алгоритма работы “ IFFT-NOISE GATE ”

Работа стенда реализуется следующим образом. После прямого преобразования Фурье выходного сигнала, записанного в файл, в частотной области выполняется две операции: операция сравнения и умножения. Для проведения фильтрации используется алгоритм нахождения значения SNR в децибелах, к которому прибавляется SNR_{dB} . Истинное значение порога находится в интервале, рассчитанном по формуле (1). После чего происходит автоматическое сравнение точек в массиве амплитуд сигнала в частотной области с выбранным порогом. Если значение амплитуды больше заданного значения, оно остается без изменения

$x_j(f)$, в противном случае умножается на заданный коэффициент, равный порога [11]:

$$y_i(f) = \begin{cases} x_i(f), & \text{if } x_i(f) > \text{Gate} \\ x_i(f) \cdot \text{Gate}, & \text{if } x_i(f) \leq \text{Gate} \end{cases}$$

где Gate выбирается по формуле (1).

После всех выше описанных преобразований выполняется обратное Фурье преобразования. В результате этих операций на выходе системы будет сигнал

вида, в котором соотношение сигнал-шум будет увеличен на заданное в начале алгоритма значение.

Для подтверждения данного алгоритма был спроектирован и реализован программный компонент, который представляет собой виртуальный прибор, выполненный в среде графического программирования LabView 9.0 и ориентированный на устранение нежелательных помех, шумов при проведении анализа спектра сигналов. Структурная схема проектируемого инструмента "IFFT-NOISE GATE" приведена на рис. 1.

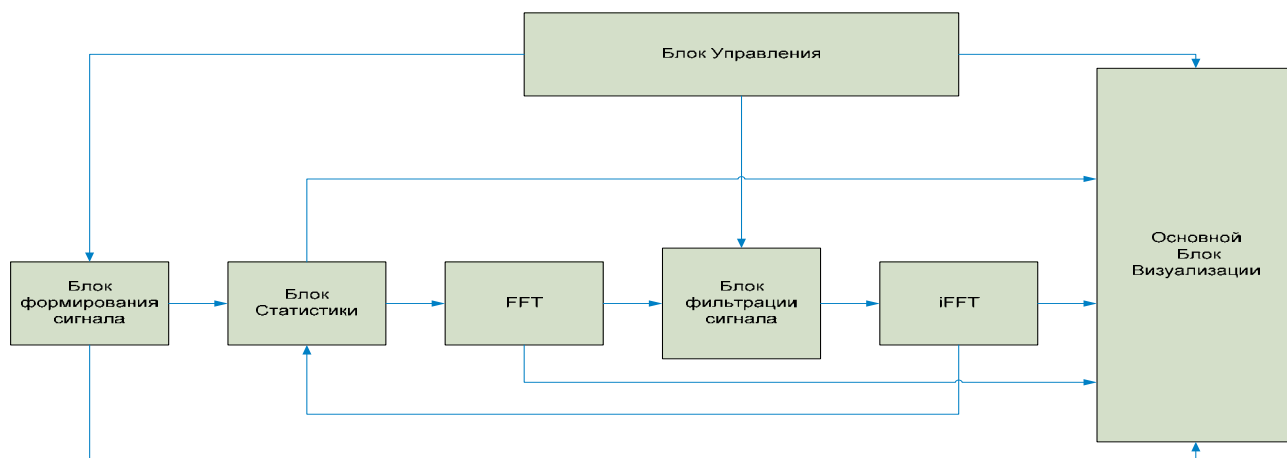


Рис. 1. Структурная схема инструмента "IFFT-NOISE GATE"

На схеме обозначены:

- FFT- Дискретное преобразование Фурье;
- iFFT- инверсное дискретное преобразование Фурье;

Назначение основных структурных единиц виртуального симулятора:

Блок формирования сигнала предназначен для формирования исследуемого сигнала заданной формы и с заданными параметрами.

Блок формирования основной визуализации предназначен для отображения операций над сигналом в реальном времени и частотной области. Блок фильтрации предназначен для обработки сигнала в частотной области, а так же понижения шума. Блок статистики необходим для предварительной оценки работы инструмента "IFFT-NOISE GATE".

Пользовательский интерфейс работы «Подавление шума» представлен на рис. 2.

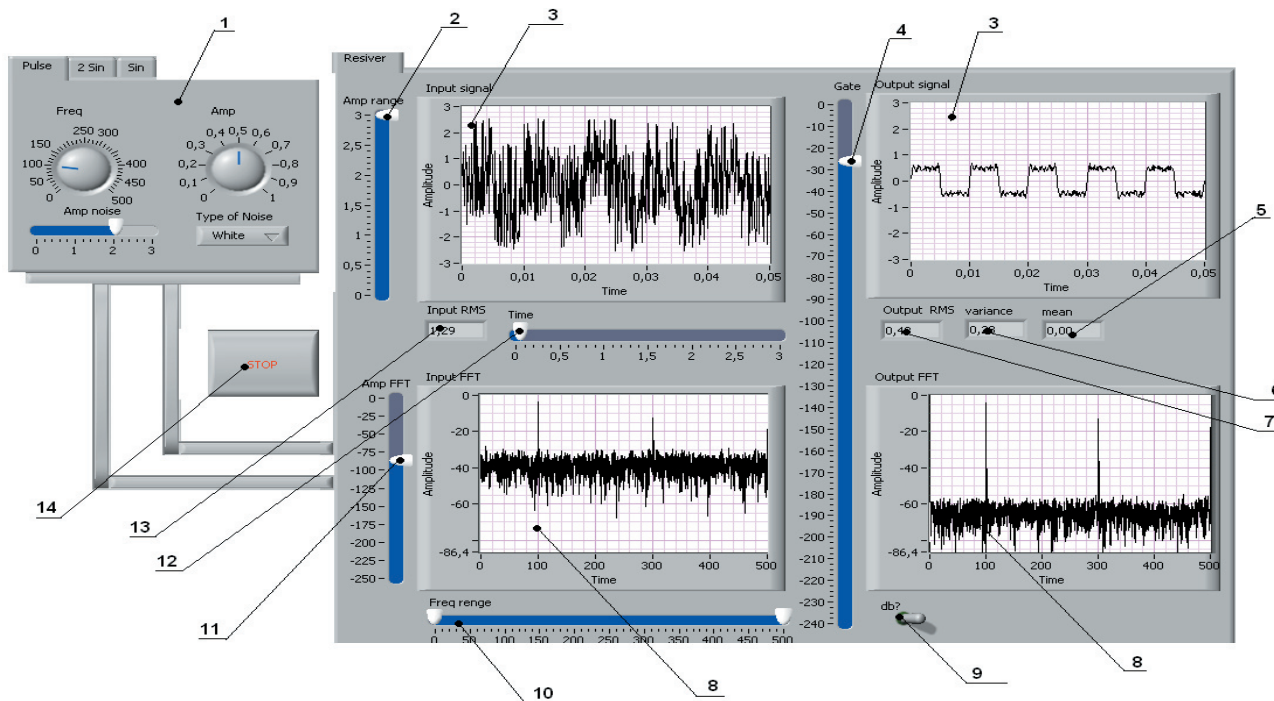


Рис. 2. Лицевая панель "IFFT-NOISE GATE"

На рис. 2 обозначено:

- 1 – блок управления генераторами сигналов,
- 2 – ручка регулировки разверткой экранов 3,
- 3 – экран отображения сигнала во временной области,
- 4 – ручка установки значения порога шумоподавления,
- 5 – среднее значение обработанного сигнала,
- 6 – дисперсия обработанного сигнала,
- 7 – СКО обработанного сигнала,
- 8 – экран отображения сигнала в частотной области,
- 9 – переключатель режима отображения сигнала в частотной области,
- 10 – ручки управления масштабом по частоте экранов 8,
- 11 – ручка управления масштабом по амплитуде,
- 12 – ручка управления отображения области сигнала во времени,
- 13 – СКО необработанного сигнала,
- 14 – кнопка остановки работы стенда.

Виртуальный прибор представлен в виде двух блоков: блока генератора сигналов и блока визуализации. Блок визуализации представлен в виде 4-х дисплеев 3 и 4, отмеченных на рис. 2, на дисплеях 3 сигнал представлен во временной области, а на дисплеях 8 в частотной области.

Для удобства отображения масштаба присутствуют регуляторы 2, 10, 11, 12. Слайдер 4 предназначен для установления значения порога обработки шумоподавления входного сигнала. При помощи переключателя 9 возможно изменять вид представления сигнала на дисплеях 8.

3.3. Моделирование работы стенда “IFFT-NOISE GATE” и сравнение его фильтрующих качеств и с существующими аналогами

Для оценки работы данного программного обеспечения был выбран метод сравнения с известными цифровыми фильтрами, а именно в практических целях были выбраны треть-октавные фильтры, как самые часто-используемые для такого рода постановки задач в цифровой фильтрации.

Характеристики фильтров для сравнения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики фильтров						
Тип фильтра	Тип фильтра	Порядок фильтра	Топология	F_d	F_{Lp}	F_{Hp}
КИХ	Band Pass	51	Rectangle	44100	270	360
БИХ	Band Pass	10	Butterworth	44100	270	360

В табл. 1 обозначено: F_d - частота дискретизации; F_{Hp} , F_{Lp} - частоты среза фильтра.

Данные фильтры были выбрана таким образом, что бы их АЧХ и ФЧХ вносили минимальные искажения в полосу пропускания.

Для исследования был выбран сигнал синусоидальной формы амплитудой 1 В и частотой 300 Гц. Для представления, результатов сравнения влияния исследуемых алгоритмов фильтрации сигнала, ре-

зультаты измерения фазы занесены в таблицы. Изменение ФЧХ и сравнение с предложенным алгоритмом фильтрации в диапазоне 10 – 100 Гц представлено в табл. 2.

Таблица 2

Измерение фазы при прохождении через фильтр

Частота, Гц Тип фильтра	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
КИХ	-3	-5	-8	-9	-12	-13	-15	-19	-26	-27
БИХ	175	170	169	168	165	164	162	160	158	150
NG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

В табл. 2 обозначено: NG - “IFFT-NOISE GATE”.

Изменение ФЧХ и сравнение с предложенным алгоритмом фильтрации в диапазоне 100 – 1000 Гц представлено в табл. 3.

Таблица 3

Измерение фазы при прохождении через фильтр

Частота, Гц Тип фильтра	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
КИХ	-47	-81	-95	-123	-147	-161	-175	181	179	-40
БИХ	150	74	75	-98	-125	-148	-150	-152	-155	-156
NG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Изменение ФЧХ и сравнение с предложенным алгоритмом фильтрации в диапазоне 1000 – 10000 Гц представлено в табл. 4.

Таблица 4

Измерение фазы при прохождении через фильтр

Частота, кГц Тип фильтра	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
КИХ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
БИХ	-160	-161	-163	-165	-165	-165	-165	-165	-165	-165
NG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Исходя из полученных данных, можно сделать следующий вывод - Изменение фазы сигнала при использовании алгоритма фильтрации “IFFT-NOISE GATE” не происходит.

Для дальнейшей оценки работы алгоритма “IFFT-NOISE GATE” произведена оценка качества фильтрации предложенного алгоритма. Среди существующих показателей, характеризующих качество фильтрации выделяют [8 – 10]:

- $SINAD (db)$ – Отношение среднеквадратичного значения амплитуды сигнала к среднему значению корня из суммы квадратов (RSS) всех остальных составляющих спектра, включая гармоники, но исключая постоянную составляющую [10];

- *THD pulse Noise (%)* – отношение среднеквадратичного значения основной частоты сигнала к среднему значению корня суммы квадратов его гармоник[10];
- *SNR (db)* – Отношение среднеквадратичного значения амплитуды сигнала к среднему значению корня из суммы квадратов (RSS) всех остальных составляющих

спектра[10];
 В табл. 5 приведены результаты исследования работы фильтров двух типов описанных в табл. 1 и работу фильтра “IFFT-NOISE GATE”. Опыт проводился путем суммирования полезного сигнала с белым шумом с шагом 0.1 В, в диапазоне от 0 до 1 В.

Таблица 5

Результаты моделирования

Амплитуда шума		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Исходный сигнал	SINAD (db)	17	10,5	8	6	4,5	3,5	3	2,2	1,9
	THD (%)	14,8	28,5	39	50	60	65	72	77	81
	SNR (db)	42	36	33	30	28	22	21	18	17
После КИХ	SINAD (db)	10,84	10,17	10,22	10,47	8,34	7,75	7,57	5,69	6,63
	THD (%)	27	30	31	33	35	40	41	42	45
	SNR (db)	45	42	38	37	33	31	30	30	28
После БИХ	SINAD (db)	20,56	19,26	17,73	16,14	14,90	13,74	12,73	11,67	10,71
	THD (%)	9	10	12	15,45	17,94	20,11	22,82	25,88	28,96
	SNR (db)	44	42	38	39	35	34	34	33	31
После NG	SINAD (db)	56	50	47	45	42	40	39	38	37
	THD (%)	1,5	3	4	6	7	9	10	12	13
	SNR (db)	84	85	81	78	75	70	68	67	65

Ниже на рис. 3 – 5 приведены результаты моделирования в виде графиков зависимости изменения параметров принятых для оценки качества фильтрации.

На рис. 3 представлено изменение коэффициента гармонических искажений в зависимости от изменения шумовой составляющей в полезном сигнале от 0 до 1 В.

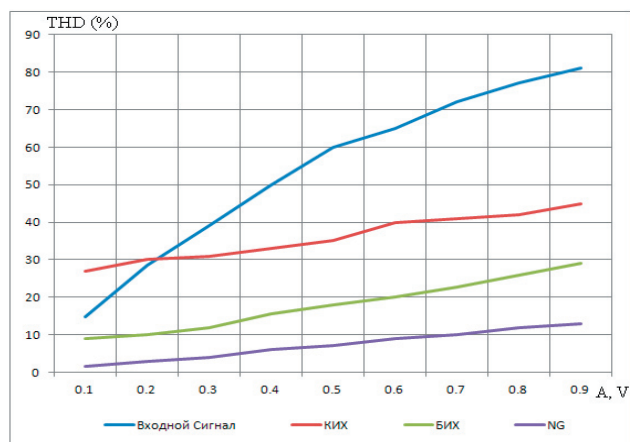


Рис. 3. Зависимость изменения THD от уровня шума

На рис. 3 представлен результат работы алгоритма “IFFT-NOISE GATE”, который превосходит работу КИХ и БИХ фильтра на 10-20 дБ.

На рис. 4 представлено изменение коэффициента синусоидальных искажений в зависимости

от изменения шумовой составляющей в полезном сигнале.

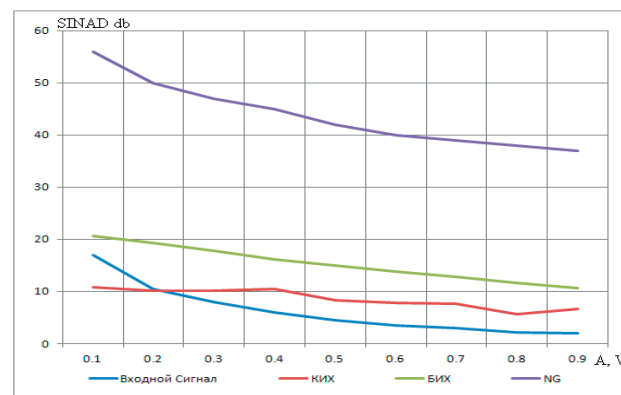


Рис. 4. Зависимость изменения SINAD от уровня шума

На рис. 4 представлено результат работы алгоритма “IFFT-NOISE GATE”, который на 30-40 дБ превосходит работу КИХ и БИХ фильтра и практически не вносит синусоидальные искажения в сигнал во время фильтрации.

На рис. 5 представлено изменение соотношения сигнал шум в зависимости от изменения шумовой составляющей в полезном сигнале.

На рис. 5 представлено результат работы алгоритма “IFFT-NOISE GATE”, что на 40-50 дБ превосходит работу КИХ и БИХ фильтра и позволяет повысить соотношение сигнал шум в несколько раз больше, чем у традиционных цифровых фильтров.

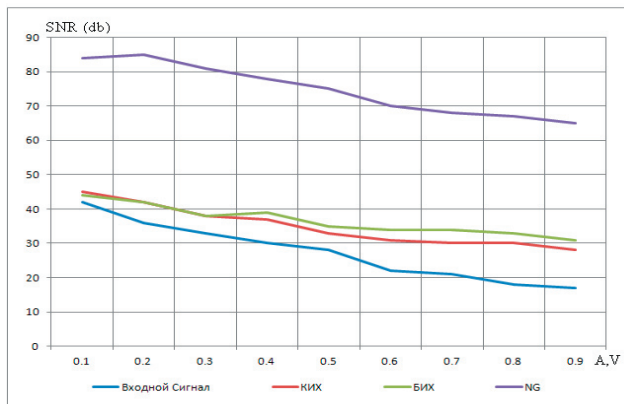


Рис. 5. Зависимость изменения SNR от уровня шума

Исходя из полученных результатов, можно сказать, что предложенный алгоритм цифровой фильтрации сигналов при первых испытаниях показал себя гораздо надежнее и обладает качеством фильтрации большим, чем у его аналогов используемых в традиционной цифровой фильтрации.

Проведя вышеописанные опыты, которые подтверждают работоспособность предложенного алгоритма "IFFT-NOISE GATE" есть смысл продолжить работу в разработках и модификациях данного метода цифровой фильтрации. Провести исследование данного алгоритма обрабатывая нестационарные сигналы, влияние частоты дискретизации на корректность работы алгоритма, исследования на разных типах сигналов и шумовых составляющих.

4. Выводы

В работе проанализированы и решены следующие научно-технические задачи:

- анализ существующих методов измерения и технических решений в области цифровой обработки сигналов показал, что ЦФ имеют ряд недостатков, которые значительно снижают качество цифровой фильтрации сигналов;

- на основе предложенного алгоритма разработан программный компонент для обработки цифровых сигналов «IFFT- Noise Gate»; приведены результаты моделирования процесса фильтрации шумов и сравнительную характеристику шумоподавляющих свойств нового алгоритма и известных аналогов по наиболее существенным параметрам: THD, SINAD, SNR. Таким образом, предложенный алгоритм позволяет обеспечить коэффициент подавления значительно выше, чем у известных аналогов на частотах в диапазоне 10 – 22050 Гц; не вносит изменений в фазу исходного сигнала, а также практически не вносит синусоидальных искажений в сигнал;

- подтверждение работоспособности разработанного ПО "IFFT-NOISE GATE" путем моделирования и испытания на примере реального сигнала с шумовой составляющей.

Результаты моделирования и сравнения дали такой результат: "IFFT-NOISE GATE" эффективен, так как не вносит искажений в ФЧХ сигнала, а рассмотренные показатели качества на порядок превосходят показатели качества известных аналогов ЦФ.

Литература

1. Блейхут, Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов [Текст] / Р. Блейхут. – М.: Мир, 1989. – 448 с.
2. Богнер, Р. Введение в цифровую фильтрацию. [Текст]: учеб.; пер. с англ. / Р. Богнер, А. Константи́дис. – М.: Мир, 1976. – 216 с.
3. Гольденберг, Л. М. Цифровая обработка сигналов [Текст]: учеб. / Л. М. Гольденберг, Б. Д. Матюшкин, М. Н. Поляк. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1990. – 256 с.
4. Лем, Г. Аналоговые и цифровые фильтры [Текст] / Г. Лем. – М.: Мир, 1982. – 592 с.
5. Нуссбаумер, Г. Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления свертки [Текст] / Г. Нуссбаумер. – М.: Радио и связь, 1985. – 248 с.
6. Опенгейм, А. Цифровая обработка сигналов [Текст] / А. Опенгейм. – М.: Связь, 1979. – 416 с.
7. Опенгейм, А. Цифровая обработка сигналов [Текст] / А. Опенгейм. – М.: Техносфера, 2006. – 856 с.
8. Прокис, Дж. Цифровая связь [Текст] / Дж. Прокис. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
9. Рабинер, Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов [Текст] / Л. Рабинер. – М.: Мир, 1978. – 848 с.
10. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов. [Текст] / А. Б. Сергиенко. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.
11. Семенов, Е. В. Повышение методов точности фильтрации сигналов. Разработка лабораторного стенда [Текст]: тез. док. международной науч.-практ. конф. «Інформаційні технології в освіті, науці і техніці», апрель 2012, Черкаси / Е. В. Семенов, В. В. Шведова; отв. ред. В. А. Королев. – Черкаси: ІТОНТ 2012 – С. 74-75.