

На правах рукописи

Дегтярев Сергей Андреевич

**ИТЕРАЦИОННО-ОПЕРАТОРНЫЙ МЕТОД НЕЛИНЕЙНОЙ  
КОМПЕНСАЦИИ И ПОСТРОЕНИЕ ПЕРСЕПТРОННЫХ МОДЕЛЕЙ  
ФИЛЬТРОВ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ**

Специальность: 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы  
и комплексы программ

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина).

**Научный руководитель:** доктор технических наук, доцент  
Соловьева Елена Борисовна

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
Коровкин Николай Владимирович

доктор технических наук, профессор  
Щербаков Сергей Валерьевич

**Ведущая организация:** Санкт-Петербургский государственный  
университет телекоммуникаций  
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

Защита состоится «20» апреля 2011 г. в 16:30 на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д212.238.01 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Автореферат разослан «15» марта 2011 г.

Ученый секретарь совета по защите  
докторских и кандидатских диссертаций, к.т.н.

Щеголева Н. Л.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Развитие аналоговой и цифровой техники идет по пути усложнения технических устройств и ужесточения требований к их качеству, в частности к линейности характеристик. Требования, предъявляемые к степени линейности проектируемых устройств электротехники, радиоэлектроники, электроакустики, как правило, выше тех, что могут быть обеспечены современными технологическими возможностями. Например, реальные усилители, активные фильтры, сумматоры и другие линейные элементы в практическом исполнении содержат существенно нелинейные элементы (транзисторы, вакуумные лампы и т. д.), нелинейные свойства которых не удастся полностью устранить во всем диапазоне изменения параметров действующих сигналов. В результате возникают нелинейные искажения.

Нелинейные искажения порождают многие нежелательные эффекты и являются причиной ухудшения ряда показателей качества как отдельных технических устройств, так и систем в целом. Использование традиционных методов борьбы с нелинейными искажениями, таких, как линейная инверсия, линеаризация характеристик отдельных нелинейных элементов и т. п., не всегда оказывается эффективным, что обусловлено повышением степени интеграции технических устройств и расширением области задач прецизионной обработки сигналов. Наиболее эффективными методами подавления нелинейных искажений являются методы их компенсации.

В условиях внешних негауссовских помех качество технических устройств и систем повышается в результате решения задачи нелинейной фильтрации. Источниками негауссовского шума являются: коммутация электротехнических устройств, шумы арифметики, повреждение объектов хранения информации, различные атмосферные явления и т. д.

В диссертационной работе в качестве негауссовского шума рассматривается импульсный шум. Классический метод борьбы с импульсным шумом – медианная фильтрация не обеспечивает высокую степень подавления помех без искажения

исходного сигнала, а известные методы полиномиальной фильтрации, лишенные указанного недостатка, сопровождаются проблемой плохой обусловленности.

В последнее время при решении задач нелинейной компенсации и фильтрации на первый план выходит необходимость достижения максимальной точности обработки сигналов, при этом стремительный рост производительности вычислительной техники уже сегодня позволяет реализовать сложные алгоритмы преобразования сигналов. Таким образом, совершенствование существующих и разработка новых методов нелинейной компенсации и фильтрации для обеспечения высокой точности обработки сигналов является актуальной задачей.

В данной работе задача нелинейной компенсации и фильтрации решается в рамках операторного подхода, когда искажающее устройство описывается нелинейным оператором, однозначно отображающим множество входных сигналов во множество выходных сигналов. Преимуществами указанного подхода являются:

- возможность моделирования процессов различной физической природы, протекающих в сложных устройствах;
- возможность моделирования устройства в ситуации, когда отсутствует информация о его внутреннем содержании или имеет место неполное описание;
- универсальность подхода, заключающаяся в применении известных моделей для синтеза устройств различного функционального назначения.

**Цель работы и задачи исследования.** Целью диссертационной работы является разработка итерационно-операторного метода компенсации нелинейных искажений сигналов в цифровых системах и построение нейронных моделей фильтров импульсных помех.

Поставленная цель достигается решением следующих основных задач:

1. Разработка итерационно-операторного метода слепой нелинейной компенсации искажений сигналов в системах, описываемых нелинейными разностными уравнениями.

2. Разработка укороченной итерационной процедуры компенсации для нелинейных нерекурсивных и рекурсивных систем, моделируемых разностными уравнениями.

3. Получение условий сходимости итерационных процедур решения нелинейных нерекурсивного и рекурсивного разностных уравнений компенсаторов.

4. Построение модели нейронного персептронного фильтра с расщепителем для подавления импульсных помех.

**Методы исследования.** Основу методологии работы составляют методы математического моделирования нелинейных систем, методы функционального анализа, теории искусственных нейронных сетей, цифровой обработки сигналов.

Для решения задач, поставленных в диссертационной работе, использованы:

– методы моделирования, идентификации и синтеза нелинейных систем на основе функциональных рядов и полиномов, описанные в работах Л. В. Данилова, Е. Б. Соловьевой, К. А. Пупкова, В. И. Капалина, Б. М. Богдановича, А. А. Ланнэ, И. К. Даугавета, Ю. А. Бычкова, С. В. Щербакова, Н. В. Коровкина;

– методы цифровой обработки сигналов, изложенные в трудах Л. М. Гольденберга, А. Б. Сергиенко, А. И. Солониной, Д. А. Улаховича, С. М. Арбузова;

– методы синтеза нелинейных систем на основе нейронных сетей, изложенные в трудах А. И. Галушкина, С. Хайкина, С. Осовского.

**Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Итерационно-операторный метод слепой нелинейной компенсации искажений сигналов в системах, описываемых нелинейными разностными уравнениями.

2. Укороченная итерационная процедура компенсации для нелинейных нерекурсивных и рекурсивных систем, моделируемых разностными уравнениями.

3. Условия сходимости итерационных процедур решения нелинейных нерекурсивного и рекурсивного разностных уравнений компенсаторов.

4. Модель нейронного персептронного фильтра с расщепителем для подавления импульсных помех.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Итерационно-операторный метод слепой компенсации нелинейных искажений сигналов в цифровых системах, описываемых нелинейными

разностными уравнениями, обеспечивает точность компенсации, недостижимую методами-аналогами.

2. Укороченная итерационная процедура решения нелинейного разностного уравнения компенсатора сокращает вычислительные затраты алгоритма компенсации.

3. Условия сходимости итерационных процедур описывают области решений нерекурсивного и рекурсивного нелинейных разностных уравнений компенсаторов.

4. Модель нейронного персептронного фильтра с расщепителем, применяемая для подавления импульсных помех, является более простой по сравнению с полиномиальной моделью, при этом не уступает ей по точности фильтрации.

**Обоснованность и достоверность полученных научных результатов** подтверждается строгостью доказательств утверждений и наложенных ограничений, обоснованностью применения математического аппарата, результатами экспериментальных исследований на программных моделях.

**Практическая ценность** работы заключается том, что полученные результаты позволяют:

1. На основе итерационно-операторного метода выполнять слепую компенсацию нелинейных искажений сигналов в цифровых системах, описываемых нерекурсивными и рекурсивными уравнениями, с точностью, недостижимой известными аналогами. Применение укороченной итерационной процедуры решения нелинейного разностного уравнения сокращает вычислительные затраты алгоритма компенсации.

2. С помощью разработанных в системе MATLAB программных средств решать задачу подавления нелинейных искажений сигналов в каналах связи с моделями Вольтерры и Винера, а также в электродинамическом громкоговорителе, моделируемом рекурсивным разностным уравнением. Итерационно-операторный метод дает более высокую точность компенсации по сравнению с его аналогами.

3. Моделировать нелинейные операторы фильтров импульсных помех на основе нейронных персептронных цепей с расщепителем. С помощью разработанного в системе MATLAB программного средства синтезировать персептронные фильтры для очистки сигналов растровых нецветных изображений от импульсного шума. На классе двумерных сигналов (сигналов изображений) персептронная модель фильтра существенно проще полиномиальной модели и не уступает ей по качеству восстановления изображений.

**Реализация и внедрение результатов исследований.** Разработанный итерационно-операторный метод нелинейной компенсации использован для линейризации моделей цифровых каналов связи в НИР №2.2.2.3.8188, выполненной на кафедре теоретических основ электротехники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) в 2009г. по аналитической ведомственной целевой программе «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)», а также в НИР «Отвага 2010» «Исследование вопросов обеспечения устойчивости системы военной связи в условиях информационного противоборства», выполненной в Военной академии связи им. С.М. Буденного по заказу Главного управления связи ВС РФ.

Предложенные в диссертационной работе методики синтеза нелинейных компенсаторов и фильтров дополняют анализ и синтез электрических цепей, выполняемый на основе схемных определителей и реализуемый в системе программ SCAD, разработанной на кафедре «Электроснабжение» Ульяновского государственного технического университета (УлГТУ). Указанные методики используются в учебном процессе цикла «Теоретические основы электротехники» кафедры «Электроснабжение» УлГТУ для проектирования высоколинейных трактов передачи радиосигналов и при моделировании четырехполюсников.

**Апробация.** Основные положения диссертации докладывались и обсуждались: на международных конференциях «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (Москва, 2008, 2009), на международном симпозиуме по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии (Санкт-

Петербург, 2009), на НТК СПбНТОРЭС им. А.С. Попова (Санкт-Петербург, 2008–2010), на НТК профессорско-преподавательского состава Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета им. В.И. Ульянова (Ленина) (Санкт-Петербург, 2008–2010), на НТК студентов и аспирантов Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (Санкт-Петербург, 2007).

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в 14 работах: из них 4 статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК, 1 статья в другом издании, 7 докладов на научных конференциях, 2 зарегистрированных программных средства.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 114 наименований, и приложений. Основная часть работы изложена на 128 страницах машинописного текста. Работа содержит 41 рисунок и 36 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность диссертационной работы, определяется цель и формулируются задачи исследования, описываются методы, применяемые для решения поставленных задач, а также указывается научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

**Глава 1** носит обзорный характер, в ней сформулированы задачи нелинейной компенсации и фильтрации в рамках операторного подхода, а также приведено описание аппроксиматоров нелинейных операторов. Математические модели, описывающие соотношение вход-выход, делятся на два класса: полиномиальные модели (функциональный ряд и полином Вольтерры, многочлен расщепленных сигналов, нелинейная авторегрессионная модель) и нейронные модели (перцептронные, рекуррентные, радиально-базисные, сплайновые). Представлен сравнительный анализ указанных математических моделей.

Рассмотрены методы слепой нелинейной компенсации: нелинейная инверсия высокого порядка, метод корней уравнения Вольтерры, метод фиксированной точки. Данные методы применяются в случае, когда известна математическая



модель искажающей системы, представленная в виде нелинейного разностного уравнения. Отмечено, что наиболее точным из рассмотренных методов является метод фиксированной точки. К недостаткам данного метода следует отнести влияние на точность компенсации приближенного описания внутреннего линейного инверсного оператора.

**Глава 2** посвящена разработке итерационно-операторного метода нелинейной компенсации искажений сигналов в нерекурсивных системах.

Операторное уравнение компенсатора в рамках данного метода формируется на основе нелинейного нерекурсивного уравнения исходного устройства

$$y(n) = A(q)[x(n)] + N[x(n)], \quad (1)$$

где  $x(n)$ ,  $y(n)$  – входной и выходной сигналы устройства соответственно,  $n$  – нормированное дискретное время,  $q$  – оператор смещения, линейный оператор

имеет вид  $A(q) = \sum_{i=0}^{I_a-1} a_i q^{-i}$ , нелинейный полиномиальный оператор:

$$N[x(n)] = \sum_{m=2}^L \sum_{i_1=0}^{I_1} \sum_{i_2=i_1}^{I_2} \dots \sum_{i_m=i_{m-1}}^{I_m} h_{i_1 i_2 \dots i_m} x(n-i_1) x(n-i_2) \dots x(n-i_m).$$

Для описания соотношения вход-выход компенсатора, действующего при разных способах его подключения к исходному нелинейному объекту (предкомпенсатор или посткомпенсатор, см. рис. 1), введены в рассмотрение входной  $u(n)$  и выходной  $w(n)$  сигналы компенсирующей цепи.

На основе равенства (1) и соотношений

$$w(n) = x(n), \quad u(n) = y(n) \quad (2)$$

записано нелинейное операторное уравнение исходного устройства:

$$u(n) = A(q)[w(n)] + N[w(n)], \quad (3)$$

Из выражения (3) получено операторное уравнение компенсатора:

$$w(n) = w(n) + A^{-1}(q)[u(n) - (A(q)[w(n)] + N[w(n)])], \quad (4)$$

где  $A^{-1}(q) = 1/A(q)$  – оператор линейной устойчивой внутренней подсистемы компенсатора, реализующий линейную свертку сигнала с бесконечной импульсной характеристикой. Для перехода к конечному разностному уравнению,

применяемому на практике, инверсный оператор  $A^{-1}(q)$  приближенно описан выражением:

$$A^{-1}(q) \cong \sum_{i=0}^{I_n-1} a_i^{(In)} q^{-i} = In(q), \quad (5)$$

где  $a_i^{(In)}$ ,  $i = 0, 1, \dots, I_n - 1$  – отсчеты инверсной импульсной характеристики.

Для решения нелинейного операторного уравнения (4) применена итерационная процедура:

$$\tilde{w}_1(n) = In(q)[u(n)];$$

$$\tilde{w}_k(n) = \tilde{w}_{k-1}(n) + In(q)[u(n) - (A(q)[\tilde{w}_{k-1}(n)] + N[\tilde{w}_{k-1}(n)])], \quad k \geq 2. \quad (6)$$

Замена выходного сигнала компенсатора  $w(n)$  приближенным сигналом  $\tilde{w}(n)$  обусловлена погрешностью решения уравнения (4) с помощью итерационной процедуры, а также аппроксимацией инверсного оператора в выражении (5).

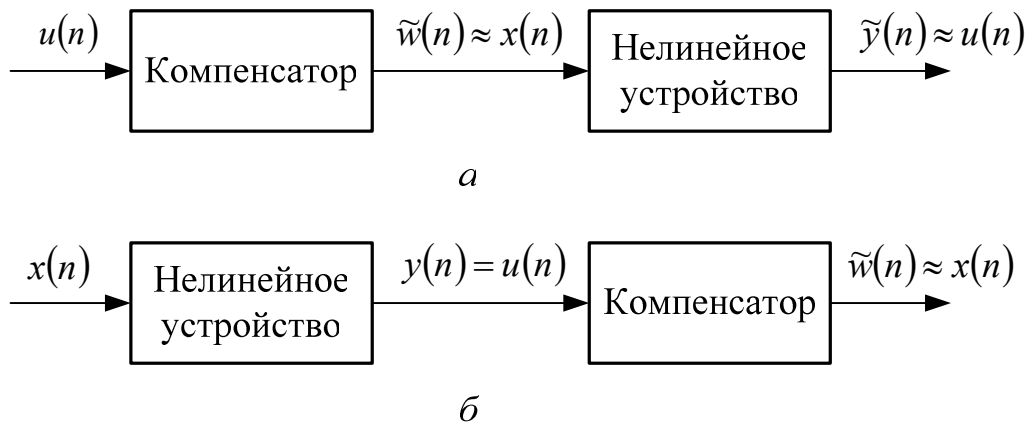


Рис. 1. Схемы подключения компенсатора

Выражение (6) представляется в следующей форме:

$$\tilde{w}_k(n) = \underbrace{In(q)[u(n) - N[\tilde{w}_{k-1}(n)]]}_1 + \underbrace{\Delta_{k-1}(n)}_2, \quad (7)$$

где  $\Delta_{k-1}(n) = \tilde{w}_{k-1}(n) - In(q)[A(q)[\tilde{w}_{k-1}(n)]]$ .

Равенство (7) содержит две составляющие: 1 – результат компенсации нелинейности исходного устройства, 2 – погрешность линейной инверсии линейной составляющей модели исходного устройства, обусловленная

приближенным описанием инверсного оператора  $A^{-1}(q)$  в выражении (5). В силу того, что уравнение (7) включает составляющую  $\Delta_{k-1}(n)$ , влияние погрешности аппроксимации инверсного оператора  $A^{-1}(q)$  на общую погрешность нелинейной компенсации минимизировано.

С ростом степени нелинейных составляющих их вклад в функциональный ряд Вольтерры снижается. Данный факт использован для упрощения итерационно-операторной процедуры: на  $k$ -й итерации вычисляются слагаемые степени не выше  $k$ ; затем результат укороченной  $k$ -й итерации используется на  $(k+1)$ -й итерации, где сохраняются слагаемые степени не выше  $k+1$ , и т. д. Использование усеченной итерационно-операторной процедуры ведет к сокращению времени обработки сигналов без понижения точности компенсации.

Итерационно-операторный метод применен для компенсации нелинейных искажений сигналов с PSK- и QAM-модуляцией в модели Вольтерры канала спутниковой связи (модель имеет пятую степень, содержит только нечетные слагаемые, длина памяти – 3 отсчета) и в модели Винера канала связи (модель имеет третью степень, длина памяти – 1 отсчет). Исследования проводились с помощью разработанного на базе пакета MATLAB программного средства. В качестве входных сигналов моделей каналов связи использовались PSK-сигналы с позиционностями 8 и 16, QAM-сигналы с позиционностями 4, 16 и 64.

В таблице представлены значения равномерной ( $\delta$ ) и среднеквадратичной ( $\epsilon$ ) погрешностей компенсации нелинейных искажений для входного сигнала 8PSK.

Таблица

Погрешности компенсации нелинейных искажений для сигнала 8PSK

Модель	Погрешность	Линейная инверсия	Инверсия высокого порядка	Метод фиксированной точки	Итерационно-операторный метод
Модель Вольтерры	$\delta$	$1,51 \cdot 10^{-1}$	$5,57 \cdot 10^{-2}$	$2,05 \cdot 10^{-4}$	$5,90 \cdot 10^{-16}$
	$\epsilon$	$4,93 \cdot 10^{-4}$	$1,07 \cdot 10^{-4}$	$7,22 \cdot 10^{-7}$	$1,06 \cdot 10^{-18}$
Модель Винера	$\delta$	$3,17 \cdot 10^{-1}$	$1,83 \cdot 10^{-1}$	$4,21 \cdot 10^{-3}$	$4,90 \cdot 10^{-9}$
	$\epsilon$	$8,51 \cdot 10^{-4}$	$4,22 \cdot 10^{-4}$	$1,50 \cdot 10^{-5}$	$5,45 \cdot 10^{-12}$

Из таблицы видно, что итерационно-операторный метод дает меньшую погрешность компенсации по сравнению с другими рассмотренными методами.

В результате исследований установлено, что при действии гауссовского шума с  $\text{snr} \geq 25$  дБ в каналах связи с моделями Вольтерры и Винера итерационно-операторный метод и метод фиксированной точки обеспечивают одинаковые погрешности компенсации, меньшие по сравнению с линейной инверсией и инверсией высокого порядка; при гауссовском шуме с  $\text{snr} < 25$  дБ в канале связи с моделью Винера итерационно-операторный метод и метод фиксированной точки дают одинаковые погрешности, меньшие по сравнению с другими рассмотренными методами, для случая модели Вольтерры при  $\text{snr} < 25$  дБ методы нелинейной компенсации, указанные в таблице, дают одинаковые результаты.

**Глава 3** посвящена разработке итерационно-операторного метода нелинейной компенсации для рекурсивных моделей искажающих систем.

В рамках данного метода операторное уравнение компенсатора формируется на основе нелинейного рекурсивного уравнения исходного устройства

$$B(q)y(n) = A(q)x(n) + N[x(n), y(n)] - N_y[y(n)], \quad (8)$$

где  $x(n)$ ,  $y(n)$  – входной и выходной сигналы устройства соответственно,  $n$  – нормированное дискретное время,  $q$  – оператор смещения, линейные

полиномиальные операторы имеют вид  $B(q) = 1 + \sum_{i=1}^{I_b} b_i q^{-i}$ ,  $A(q) = \sum_{i=0}^{I_a-1} a_i q^{-i}$ ,

нелинейные полиномиальные операторы:

$$\begin{aligned} N[x(n), y(n)] &= \sum_{m=2}^L \sum_{i_1=0}^{I_1} \sum_{i_2=i_1}^{I_2} \dots \sum_{i_m=i_{m-1}}^{I_m} h_{i_1 i_2 \dots i_m} x(n-i_1) x(n-i_2) \dots x(n-i_m) + \\ &+ \sum_{m=2}^L \sum_{g=1}^{m-1} \sum_{i_1=0}^{I_1} \sum_{i_2=i_1}^{I_2} \dots \sum_{i_g=i_{g-1}}^{I_g} \sum_{i_{g+1}=i_g}^{I_{g+1}} \sum_{i_{g+2}=i_{g+1}}^{I_{g+2}} \dots \sum_{i_m=i_{m-1}}^{I_m} c_{i_1 i_2 \dots i_m}^{(g, m-g)} x(n-i_1) x(n-i_2) \dots \\ &\dots x(n-i_g) y(n-i_{g+1}) y(n-i_{g+2}) \dots y(n-i_m), \\ N_y[y(n)] &= \sum_{m=2}^{L_y} \sum_{i_1=1}^{I_1} \sum_{i_2=i_1}^{I_2} \dots \sum_{i_m=i_{m-1}}^{I_m} r_{i_1 i_2 \dots i_m} y(n-i_1) y(n-i_2) \dots y(n-i_m). \end{aligned}$$

На основе равенств (2) и (8) получено операторное уравнение компенсатора:

$$\tilde{w}(n) = In(q)[B(q)u(n) + N_u[u(n)]] - In(q)N[\tilde{w}(n), u(n)] \quad (9)$$

Для нахождения решения нелинейного операторного уравнения (9) компенсатора используется итерационная процедура:

$$\tilde{w}_1(n) = In(q)[B(q)u(n) + N_u[u(n)]],$$

$$\tilde{w}_k(n) = [\tilde{w}_1(n) - In(q)N[\tilde{w}_{k-1}(n), u(n)]] + \Delta_{k-1}(n), \quad (10)$$

где  $\Delta_{k-1}(n) = \tilde{w}_{k-1}(n) - In(q)A(q)\tilde{w}_{k-1}(n)$ .

Поскольку уравнение (10) включает составляющую  $\Delta_{k-1}(n)$ , погрешность нелинейной компенсации, получаемая итерационно-операторным методом, не зависит от величины памяти внутренней линейной инверсной подсистемы компенсатора.

Предложена укороченная итерационная процедура компенсации для случая рекурсивной модели искажающей системы.

Программное средство, разработанное в системе MATLAB на основе итерационно-операторного метода, применено для компенсации нелинейных искажений сигналов в рекурсивной модели электродинамического громкоговорителя пятой степени при гармоническом и бигармоническом воздействиях. Частота гармонического входного сигнала модели меняется в диапазоне от 50 до 4000 Гц с интервалом в треть октавы. Для бигармонического воздействия частота первой составляющей равна 50 Гц, частота второй составляющей принимала значения 500, 1000, 2000 и 4000 Гц. Амплитуда второй составляющей равна четверти от амплитуды первой. Частота дискретизации во всех экспериментах равна 20 кГц.

При синусоидальном воздействии с частотой 1000 Гц метод фиксированной точки дает  $\delta = 2,16 \cdot 10^{-2}$  (равномерную) и  $\varepsilon = 3,30 \cdot 10^{-3}$  (среднеквадратичную) погрешности, итерационно-операторный метод –  $\delta = 2,63 \cdot 10^{-5}$ ,  $\varepsilon = 3,42 \cdot 10^{-6}$ . При бигармоническом воздействии с частотами 50 и 1000 Гц метод фиксированной точки обеспечивает компенсацию с погрешностями:  $\delta = 1,77 \cdot 10^{-2}$ ,  $\varepsilon = 4,79 \cdot 10^{-4}$ , итерационно-операторный метод – с  $\delta = 1,39 \cdot 10^{-7}$ ,  $\varepsilon = 1,22 \cdot 10^{-9}$ .

Таким образом, итерационно-операторный метод дает существенно меньшие погрешности компенсации по сравнению с методом фиксированной точки.

Погрешность компенсации итерационно-операторным методом не зависит от погрешности приближенного описания внутреннего линейного инверсного оператора компенсатора. Вычислительные затраты итерационно-операторной процедуры уменьшаются при ее усечении, точность компенсации при этом сохраняется.

**Глава 4** посвящена синтезу нейронных фильтров импульсных помех на основе персептронной модели с расщепителем.

Задача построения нейронных фильтров импульсных помех решается в рамках принципа «черного ящика». Для подавления импульсных помех синтезируются комбинированные фильтры со структурой, изображенной на рис. 2. МФ – внутренний сглаживающий медианный фильтр, Р – расщепитель, НС – нейронная сеть.

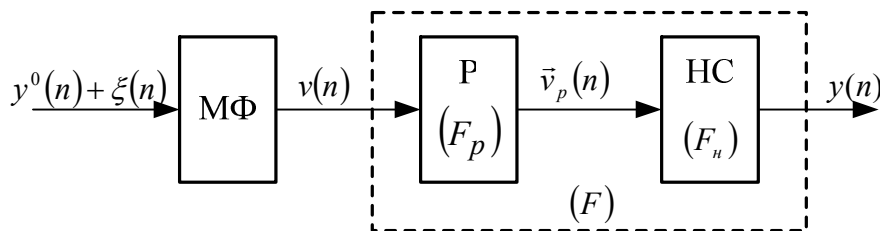


Рис. 2. Структура комбинированного нейронного фильтра с расщепителем

Здесь оператор  $F$  является композицией двух операторов:  $F_p$  и  $F_n$ . Оператор-расщепитель ( $F_p$ ) преобразует скалярные сигналы  $v(n)$  в векторные сигналы  $\bar{v}_p(n) = [v_1(n), v_2(n), \dots, v_m(n)]^t$ , так чтобы выполнялись условия: векторные сигналы не должны исчезать и в каждый момент времени должны быть разными.

В качестве нейронной сети (НС) с оператором  $F_n$  использован двухслойный персептрон. Модель комбинированного двухслойного персептрона с расщепителем (КДП) имеет вид

$$y(n) = \sum_{i=1}^N c_i G \left( \sum_{j=1}^m w_{ij} v_j(n) + b_i \right), \quad (11)$$

где  $w_{ij}$  – весовые коэффициенты нейронов скрытого слоя,  $b_i$  – коэффициенты смещения нейронов скрытого слоя,  $c_i$  – весовые коэффициенты выходного слоя,  $N$  – количество нейронов в скрытом слое,  $G$  – сигмоидальная функция активации.

С помощью разработанного в системе MATLAB программного средства на основе КДП синтезированы фильтры импульсных помех, применяемые для обработки двумерных сигналов, например сигналов изображений (использованы растровые (точечные) нецветные изображения при разрешении, измеряемом 256 уровнями серого). Импульсный шум представляет собой включенные и выключенные пиксели (белые и черные точки на изображении), появление которых не зависит от наличия выброса шума в соседних точках. В исследованиях вероятности появления выброса шума в точке изображения равнялись:  $p = 0,3$  (средняя плотность шума) и  $p = 0,5$  (высокая плотность шума). Степень подавления импульсного шума разными методами фильтрации оценивалась в среднеквадратичной метрике.

Результаты нейронной фильтрации сравнивались с результатами, полученными полиномиальными фильтрами (комбинированным фильтром Вольтерры (КФВ), фильтром в виде каскадного соединения КФВ и МФ (КФВМ)), а также МФ с квадратными апертурами размером  $3 \times 3$  и  $5 \times 5$ .

При средней плотности импульсного шума среднеквадратичная погрешность восстановления изображений КДП с двумя нейронами и сглаживающим МФ  $3 \times 3$  равна погрешности обработки КФВ 3-й степени с МФ  $3 \times 3$  и существенно ниже погрешностей медианной фильтрации. Указанные КФВ и КДП дают одинаковое качество изображений.

При высокой плотности импульсного шума КФВМ 3-й степени с МФ  $3 \times 3$  обеспечивает меньшую погрешность фильтрации по сравнению с КДП и МФ. Однако качество изображений на выходе указанного КФВМ и КДП со сглаживающим МФ  $5 \times 5$  и тремя нейронами практически одинаково.

Как показали исследования, для борьбы с импульсными помехами целесообразно использовать КДП, не уступающие по качеству восстановления изображений КФВ и КФВМ, но имеющие модель существенно проще указанных аналогов (модели КФВ 2-й и 3-й степени содержат 54 и 219 параметров

соответственно, модели КДП с двумя и тремя нейронами – 22 и 33 параметра соответственно).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан итерационно-операторный метод слепой компенсации нелинейных искажений сигналов в цифровых системах, описываемых нелинейными разностными уравнениями, обеспечивающий точность компенсации, недостижимую методами-аналогами (инверсией высокого порядка, методом фиксированной точки). Показано, что погрешность нелинейной компенсации, полученная итерационно-операторным методом, не зависит от порядка внутренней линейной инверсной подсистемы компенсатора. Данное свойство использовано в итерационной процедуре для сокращения вычислительных затрат без понижения точности компенсации. Итерационно-операторный метод, реализованный в виде программных средств в системе MATLAB, применен для подавления нелинейных искажений сигналов в моделях Вольтерры и Винера цифровых каналов связи, в рекурсивной модели электродинамического громкоговорителя.

2. Разработана укороченная итерационная процедура решения нелинейного разностного уравнения компенсатора для сокращения вычислительных затрат алгоритма компенсации. Показано, что усечение итерационной процедуры не ведет к снижению точности компенсации и к увеличению длительности процесса сходимости процедуры к решению нелинейного операторного уравнения компенсатора.

3. Получены условия сходимости итерационных процедур решения нелинейных нерекурсивного и рекурсивного разностных уравнений компенсаторов.

4. Предложена модель нейронного персептронного фильтра с расщепителем для подавления импульсных помех. С помощью разработанного на базе пакета MATLAB программного средства синтезированы нелинейные фильтры импульсных помех на классе двумерных сигналов (сигналов изображений). Показано, что персептронная модель, будучи более простой, не уступает по точности фильтрации полиномиальной модели Вольтерры.



## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Дегтярев С.А. Синтез нейронных фильтров импульсных помех для восстановления изображений [Текст] / Соловьева Е.Б., Дегтярев С.А. // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2008. – №12. – С. 46–57.

2. Дегтярев С.А. Подавление нелинейных искажений сигналов в спутниковом канале связи на основе итерационно-операторного метода [Текст] / Соловьева Е.Б., Дегтярев С.А. // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2009. – №4. – С. 32–42.

3. Дегтярев С. А. Итерационно-операторный метод нелинейной компенсации в рекурсивных системах [Текст] / Соловьева Е. Б., Дегтярев С. А. // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2009. – №9. – С. 47–59.

4. Дегтярев С.А. Линеаризация модели Винера каналов связи итерационно-операторным методом [Текст] // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2010. – №3. – С. 33–40.

### Публикации в других изданиях и материалы конференций:

5. Дегтярев С.А. Применение итерационно-операторного метода для «слепой» линеаризации рекурсивных систем [Текст] / Соловьева Е.Б., Дегтярев С.А. // Синтез, анализ и диагностика электронных цепей: Международный сборник научных трудов / Под ред. В.В. Филаретова. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – Вып. 6. – С. 237–246.

6. Дегтярев С.А. Применение нейронных аппроксиматоров для фильтрации импульсных помех [Текст] / Соловьева Е.Б., Дегтярев С.А. // Цифровая обработка сигналов и ее применение: Сб. докл. 10-й Междунар. науч.-техн. конф., г. Москва, 26–28 марта 2008 г. – Москва: ООО «Инсвязьиздат». – 2008. – Вып. X-2. – С. 680–683.

7. Дегтярев С.А. Нейронная фильтрация двумерных импульсных помех [Текст] // 63-я научно-техническая конференция СПбНТОРЭС им. А.С. Попова: Труды конференции, г. С.-Петербург, апрель 2008 г. – С.-Петербург: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2008. – С. 65–67.

8. Дегтярев С.А. Линеаризация рекурсивных систем итерационно-операторным методом [Текст] / Соловьева Е.Б., Дегтярев С.А. // Цифровая обработка сигналов и ее применение: Сб. докл. 11-й Международной науч.-техн. Конф., г. Москва, 25-27 марта 2009 г. – Москва: ООО «Инсвязыздат». – 2009. – Вып. XI-1. – С. 85–88

9. Дегтярев С.А. Итерационно-операторная компенсация в нелинейных каналах связи [Текст] // 64-я научно-техническая конференция СПбНТОРЭС им. А.С. Попова: Труды конференции, г. С.-Петербург, апрель 2009 г. – С.-Петербург: ООО «Технопромимпорт». – 2009. – С. 38–39.

10. Дегтярев С.А. Борьба с импульсными помехами перцептронными фильтрами с расщепителем [Текст] / Соловьева Е.Б., Дегтярев С.А. // 8-й международный симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии: Труды симпозиума, г. С-Петербург, 16-19 июня 2009 г. – С.-Петербург: ООО «Технопромимпорт». – 2009. – С. 287–290.

11. Дегтярев С.А. Итерационно-операторная линеаризация каналов связи, представленных моделью Винера [Текст] // СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 63-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава университета: Сборник докладов студентов, аспирантов и молодых ученых. Санкт-Петербург, 26 января – 6 февраля 2010 г. – СПб: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2010. – С. 147–152.

12. Дегтярев С.А. Сравнительный анализ методов линеаризации цифровых систем по соотношению вход-выход [Текст] // 65-я научно-техническая конференция СПбНТОРЭС им. А.С. Попова, 20–27 апреля 2010 г.: Труды конференции. – С.-Петербург: ООО «АльфаГарант». – 2010. – С. 67–68.

#### **Зарегистрированные программные средства:**

13. Синтез трехслойных перцептронных фильтров для удаления импульсного шума с изображений [Текст] / Соловьева Е.Б., Дегтярев С.А.; С.Петербург. электротехн. ун-т. – ГосФАП; Инв. №50200701015. – 2007. – 13 с.

14. Итерационно-операторная процедура нелинейной рекурсивной компенсации [Текст] / Соловьева Е.Б., Дегтярев С.А.; С.Петербург. электротехн. ун-т. – ГосФАП; Инв. №50200900414. – 2009. – 14 с.