

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Сластен М.И.* Ультразвуковой контроль остаточных механических напряжений в монокристаллах галлий-гадолиниевого граната. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. – 127 с.
2. *Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.* Справочник по математике. – М.: Наука, 1986. – 544 с.
3. *Тимошенко С.П., Гудьер Дж.* Теория упругости / Пер. с англ. М.И. Рейтмана / Под ред. Г.С. Шапиро. – 2-е изд. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 560 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор Г.В. Куповых.

Сластен Михаил Иванович

Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: slasten@mvs.tsure.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 88634371663.

Кафедра физики; к.т.н.; доцент.

Slasten Michail Ivanovitch

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: slasten@mvs.tsure.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: +78634371663.

The Department of Physics; Cand. of Eng. Sc.; Associate Professor.

УДК 621.396.49

В.Г. Золотых, М.С. Пашенко, Л.М. Перерва, В.В. Юдин

СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ МАТРИЦЫ СИСТЕМЫ СВЯЗИ С ПСЕВДОСЛУЧАЙНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ

Приводятся результаты сопоставления сеансов функционирования системы связи с ППРЧ и соответствующих численных моделей. Рассмотрены модель с динамическим хаосом (отображение Энона) и квазистохастическая модель (гауссов шум). Сравнительный анализ ведется в рамках оценки структурных функций. Указывается промежуточное положение системы с ППРЧ между стохастическими и хаотическими системами, делается вывод о фрактальном характере ее функционирования.

ППРЧ; структурная функция; фрактальность; стохастика; хаос.

V.G. Zolotych, M.S. Paschenko, L.M. Pererva, V.V. Yudin

STRUCTURAL ANALYSIS OF FREQUENCY HOPPING SYSTEM TIME-FREQUENCY MATRIX

The results of comparison of frequency-hopping system work sessions and corresponding numerical models are given. Dynamic chaos model (Henon map) and quasistochastic model (Gaussian noise) are considered. Comparative analysis is taken from the aspect of structure functions comparison. Intermediate position of a frequency hopping system between stochastic and chaotic systems is stated, fractal nature of its operation is assumed.

Frequency hopping; structure function; fractality; stochastics; chaos.

Создание систем связи с расширением спектра методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ) предполагает наряду с соответствующим кодированием и криптозащитой функционирование датчиков псевдослучайных чи-

сел с соответствующими параметрами, которые отражаются в вероятностной структуре частотно-временной матрицы (ЧВМ). Если исходить из того, что связанной ресурс является мультипликацией всех компонент формализованного пространства, то количество разнообразия частотно-временных траекторий для корреспондентов, с которым сталкиваются радио- и радиотехническая разведки, поистине огромно. основополагающий принцип построения таких систем предполагает равномерное использование всего множества рабочих частот (РЧ) [1] и псевдошумовую эксплуатацию эфира. Следовательно, правильно спроектированная система с ППРЧ должна обладать шумоподобной структурой эксплуатации частотно-го ресурса.

В настоящее время общепринятой точкой зрения на борьбу с системами ППРЧ является подавление таких систем с помощью постановки прицельных по частоте помех на РЧ, предсказанных путем определения параметров генератора псевдослучайных чисел (ГПСЧ) атакуемой системы [1,2]. Считается, что если не удастся определить параметры ГПСЧ, то эффективная борьба, особенно со сверхбыстрой ППРЧ, становится маловероятной.

Мы предлагаем альтернативу общепринятой точке зрения на борьбу с системами связи подобного класса [3]. По нашему мнению, следует атаковать эфир разрешенных рабочих частот с определенной стратегией атаки. Одна из главных составляющих такой стратегии атаки – нападение не на сам сеанс связи, а на вероятность выхода в эфир на соответствующих частотах. Кроме того, такая стратегия была бы более эффективна, если бы системы с ППРЧ обладали какой-либо спецификой функционирования в эфире. Под этим мы понимаем апостериорную ЧВМ. Смысл последней категории состоит в реальной частотной эксплуатации эфира разрешенных частот. В общем случае такая эксплуатационная структура может быть вовсе не равномерной. Традиционные принципы построения систем ППРЧ не подразумевают какую-либо апостериорную специфику. Эксплуатация ресурса РЧ системой ППРЧ должна иметь равномерную вероятностную структуру.

Анализ апостериорной ЧВМ систем связи с ППРЧ подразумевает фильтрацию исходного процесса. Мы в своих работах применяем так называемую гильбертову фильтрацию [5]. Наша трактовка гильбертовой фильтрации базируется на введении понятия огибающей в смысле Крамера-Лидбеттера, которая, в отличие от огибающей узкополосных сигналов, не имеет физического смысла. Но это не значит, что это понятие бесполезное. Данная процедура имеет смысл для широкополосной смеси аддитивного типа. По конкретной реализации случайного процесса строятся верхняя и нижняя огибающие, которые позволяют построить некоторую «среднюю линию». И ясно, что в общем случае такая операция имеет итеративный характер. Иерархия средних линий и есть НЧ-составляющая, а их вычитания из исходного процесса представляют ВЧ-компоненты. Это и есть результат гильбертовой фильтрации. Видно, что структура иерархии ВЧ- и НЧ-компонент диктуется статистикой экстремумов случайного процесса. С точки зрения чисто радиотехнической, исходный широкополосный процесс раскладывается на сумму узкополосных, параметры которых продиктованы вышеупомянутой статистикой экстремумов. Тем самым гильбертов фильтр в нашем понимании является согласованным адаптивным фильтром. Гильбертова фильтрация нами применяется в случае, если исходные процессы структурно неоднородны. К тому же попутно решается в иерархии НЧ-составляющих проблематика нестационарности. Такая фильтрация поможет в методическом плане решить проблему нестационарности и структурной неоднородности исходных процессов, если эти аспекты содержатся в них.

В случае обнаружения какой-либо нетривиальной апостериорной структуры нарушается главный принцип проектирования систем ППРЧ. Если этот принцип в апостериорной версии не работает, то тогда учет специфики функционирования

системы ППРЧ может существенно упростить задачу борьбы. В таком случае нет никакой необходимости решать довольно сложную задачу вскрытия параметризации ГПСЧ.

В данной работе мы продолжаем одно из направлений наших работ [3,7], в которых ищутся методы по установлению апостериорной структуры ЧВМ системы с ППРЧ. Одним из методов идентификации мы решили выбрать метод структурной функции [4] и применить его к анализу ЧВМ. Вообще говоря, метод структурной функции в теории случайных процессов хорошо разработан, но в прикладных задачах он встречается значительно реже, чем, например, корреляционно-спектральный анализ [6].

Выражение структурной функции имеет следующий вид:

$$S(T, \tau) = \int_0^T \{x(t) - x(t - \tau)\}^2 dt. \quad (1)$$

Данное выражение является функцией двух временных параметров. Один из них τ – параметр сдвига, а T – верхний предел в определенном интеграле. Вообще при реальном анализе желательно брать $T \rightarrow \infty$. Фактически это будет означать, что $T \gg \tau$. При конкретной методике обработки τ сдвига выбирается, например, из условия теоремы Шеннона–Котельникова. Надо помнить, что выражение (1) применяется не к первичным процессам, а к центрированным компонентам. Поэтому $x(t)$ и $x(t - \tau)$ – это центрированный процесс. Операция центрирования может иметь различный вид для соответствующих фильтров.

$$\lim_{T \rightarrow \infty} S(T, \tau) = 0. \quad (2)$$

Это означает, что при $T \gg \tau$ структурная функция должна иметь нулевую асимптотику. По своему формализму структурная функция описывает меру различия, меру дивергенции в структуре случайного процесса. Корреляционная функция наоборот описывает меру сходства или близости между случайными процессами. Из формулы (1) нетрудно установить взаимосвязь между структурной и корреляционной функциями:

$$S(T, \tau) = \int_0^T \{x^2(t) + x^2(t - \tau) - 2x(t)x(t - \tau)\} dt = \varepsilon(T) + \varepsilon(T, \tau) - K_{xx}(T, \tau), \quad (3)$$

где $\varepsilon(T)$ и $\varepsilon(T, \tau)$ – энергии, $K_{xx}(T, \tau)$ – корреляционная функция.

Из формулы (3) видно, что структурная функция, как и положено, сформирована на уровне энергии и ковариационных функций. Как и в корреляционном анализе [6], наш уровень рассмотрения соответствует двумерному приближению. Выражение (3) является энергетическим дополнением корреляционной функции. Энергия $\varepsilon(T)$ – это энергия исходного случайного процесса $x(t)$, а $\varepsilon(T, \tau)$ – это энергия сдвинутого на τ случайного процесса.

Согласно (3) мы видим, что в структурной функции третье нетривиальное слагаемое представляет собой именно корреляционную функцию, которая ответственна за меру статистической связи амплитуд процесса, в сдвинутых временных сечениях. Именно разность в формуле (3) и позволяет утверждать, что структурная функция является мерой различия, дивергенции в структуре случайного процесса. С этих позиций структурный анализ является более общим, чем корреляционный.

Согласно нашей методологии в настоящей работе, основная задача исследования состоит в идентификации характера структурных функций системы связи с ППРЧ среди некоторого класса крайних моделей, определения их близости к какому-либо классу. Оценку степени сходства, близости следует проводить не прямым способом, а через оценку различия. Необходимо помнить – минимум различия и есть сходство.

Наша задача относится к несколько своеобразной методике проверки гипотез. Мы решили образовать своего рода шкалу, где, с одной стороны, находятся квазистохастические модели, а, с другой стороны – модели, допускающие режим динамического хаоса, но полностью лишённые стохастики. Модели первого класса – АБГШ, броуновское движение, второго класса – модель Энона, Икеды.

Для нашего качественного анализа обычно использовались структурные функции двух масштабов, отличающихся на порядок. В более широком «окне» можно рассматривать общий характер строения структурной функции – так называемую промежуточную асимптотику. При более узком «окне» выступают детали поведения структурной функции в окрестности нуля. В остальном на этапе сервисных функций была проведена единая нормализация всех моделей и натуральных экспериментов.

На рис. 1 приведены в двух масштабах структурные функции модели гауссова шума. Следует отметить, что рассмотрение функций в различных масштабах можно представить как рассмотрение работы системы ППРЧ на разных временных уровнях функционирования – например на уровне кадра и импульса.

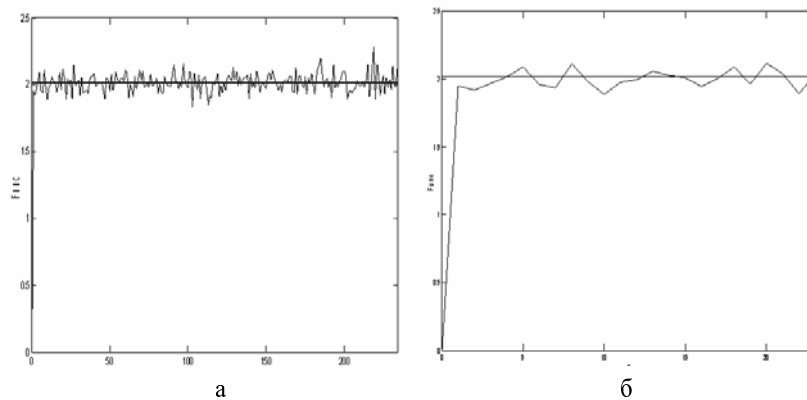


Рис. 1. Структурная функция модели гауссова шума:
а – масштаб 20 %; б – масштаб 2 %

Согласно характеристикам данной модели вряд ли стоит ожидать проявления каких-либо нестационарностей и неоднородностей. Эта система допускает существование стационарного в целом режима, который приходится на амплитуду в две условные единицы.

Рис. 1,а,б допускает равномерное осцилляторное поведение нерегулярного вида. Аналогично при больших апертурах структурные функции гауссова шума характеризуются равномерным стохастическим осцилляторным поведением. Данная модель с точки зрения структурной функции [4] соответствует шумоподобным сценариям функционирования. Во всех ЧВМ таких моделей нет никаких предпочтений в существовании каких-либо кластеров.

Перейдем к другому классу детерминированных хаотических моделей. На рис. 2 показаны двухмасштабные структурные функции модели Энона. Даже на визуальном уровне сразу видно отличие этого класса моделей от стохастических.

По амплитудному показателю модель Энона составляет чуть больше одной условной единицы. Модель Энона характеризуется яркими кластерами всплесков и очень напоминает биения нерегулярного типа, но детерминированного. Если обратиться к рис. 2,а,б, то у модели Энона появляется четкая квазипериодичность. На обоих структурных функциях, в отличие от стохастических, видно ниспадающее поведение огибающей структурной функции. Такого поведения на стохастических моделях нет. Бесспорно, модель Энона соответствует некоторым хаотическим автоколебаниям, такие модели кардинально отличаются от шумоподобных. В связи с этим обстоятельством делается вывод, что нами привлечены два крайних класса систем, которые имеют своими представителями вышеуказанные типы моделей.

Дальнейший структурный анализ проводился над сеансами функционирования системы связи с ППРЧ различной длины. Длины сеансов следующие: 1177, 956, 1955, 5174 пакета. Эти ЧВМ, согласно вышеприведенной методике структурной функции, обладают следующими апертурами двух масштабов: 250 и 25, 190 и 18, 375 и 38, 1000 и 100 соответственно. Такие апертуры позволяют использовать необходимые окна для обработки структурной функции, отличающиеся на порядок. Более короткая апертура позволяет увидеть особенности поведения структурной функции в коротковолновой части, а более длинные апертуры позволяют проводить структурный анализ на промежуточных асимптотиках.

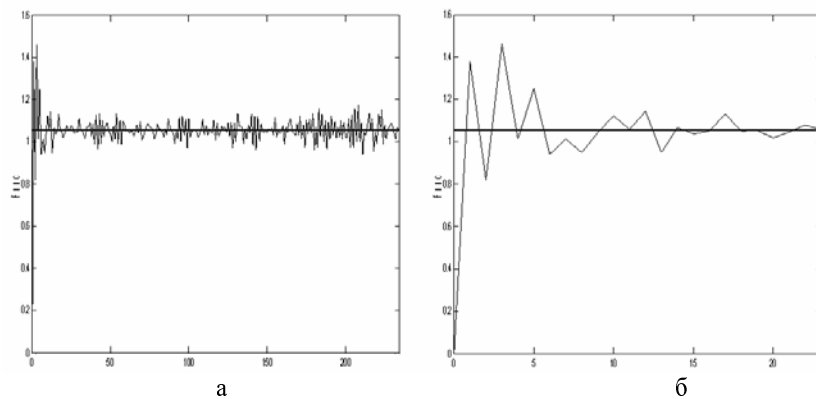


Рис. 2. Структурная функция модели Энона: а – масштаб 20 %; б – масштаб 2 %

Главная наша задача в данной работе – проверка гипотезы близости данных ЧВМ системы связи с ППРЧ к хаотическим или квазистохастическим моделям. Наш уровень рассмотрения этой проблемы носит качественный характер. В литературе мы не нашли соответствующим образом опробированных методов количественного решения задачи «проверки гипотезы» методики структурной функции. Поэтому ограничимся небольшим набором топологических характеристик структурных функций.

Среди этих характеристик выберем следующие:

- ◆ факт наличия трендов или нестационарностей, сюда же стоит отнести и возможные низкочастотные составляющие;
- ◆ характер поведения структурных функций в коротковолновой окрестности;
- ◆ топологический характер поведения структурных функций в средней асимптотике, факт наличия кластерной или всплесковой тонкой подструктуры; заметим, что коротковолновые и средние масштабы отличаются на порядок;
- ◆ в качестве еще одного признака можно взять амплитуду стационарного состояния, если таковая будет установлена.

Мы считаем, что этих характеристик будет достаточно для предварительного качественного анализа топологической близости структурных функций ЧВМ системы связи с ППРЧ на шкале наших тестовых экспериментов, в качестве которых были выбраны стохастические и динамические стратегии функционирования.

На рис. 3,а,б приведены в двух аперттурах структурные функции сеанса работы системы связи с ППРЧ.

Из общего топологического анализа структуры ЧВМ нами были получены следующие результаты:

1. Структурные функции сеансов системы связи с ППРЧ обладают четко выраженным уровнем. Это обстоятельство означает, что каких-либо трендов или более сложных нестационарностей в структуре ЧВМ не наблюдается. По этому показателю видимо все ЧВМ, если и обладают тонкой структурой, то все они характеризуются ярко выраженной стационарностью ЧВМ.

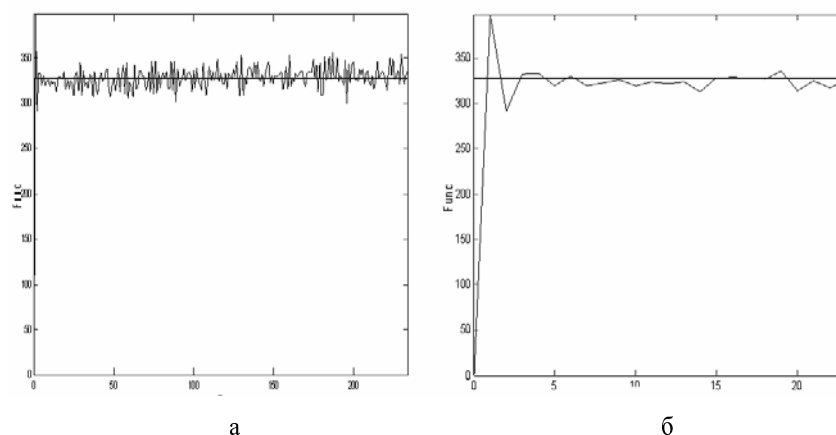


Рис. 3. Структурная функция сеанса системы связи с ППРЧ:
а – масштаб 20 %; б – масштаб 2 %

2. В обоих масштабах аперттуры, особенно коротковолновой ее части, для всех сеансов четко прослеживается сильный начальный всплеск с последующим осцилляторным поведением. Данный факт может говорить о некоторой автоколебательности тонкой структуры ЧВМ. Это явление автоколебательности имеет всеобщий характер и видимо является, по крайней мере, необходимым условием существования в ЧВМ автоволновой структуры. Как всякая автоволновая структура, это не квазистохастический режим функционирования системы связи с ППРЧ. Однако для полного доказательства волнового характера коротковолновой асимптотики недостаточно.

3. Обратимся к среднемасштабной асимптотике ЧВМ сеансов системы связи с ППРЧ. Визуально топологический анализ, в том числе рис. 3, сразу указывает на некоторую кластерную, всплесковую структуру ЧВМ, которая характерна для всех сеансов связи, особенно ярко она проявляется на сеансах длиной 1955 и 5174 пакета. Эта осцилляторная подструктура также видна на сеансах длиной 1177 (рис. 3) и 956 пакетов.

4. Этот пункт касается величины амплитуды стационарности. Для сеанса длиной 1177 пакетов она составляет 330 отсчетов, для сеанса длиной 956 пакетов – 170 отсчетов, для сеанса длиной 1955 пакетов – 200 отсчетов, для сеанса длиной 5174 пакета – 200 отсчетов. С этих позиций все ЧВМ фактически имеют одну и ту же амплитуду стационарности. Это означает существование одинакового уровня по выразительности структуры ЧВМ обсуждаемых сеансов.

В завершение проведем качественное сопоставление ЧВМ сеансов связи системы с ППРЧ и тестовых экспериментов. И на этом уровне мы также ограничимся качественным рассмотрением. Напомним, что в рамках нелинейных динамических моделей с хаотическим поведением примером является модель Энона. А со стороны стохастических моделей – модель гауссова шума. Последняя является представителем чисто стохастических стратегий функционирования. В этих системах какой-либо тонкой кластерной подструктуры не видно. Такие режимы функционирования можно аппроксимировать, по крайней мере, квазистохастическим равномерным осцилляторно-волновым поведением. В системе Энона, наоборот, четко видна тонкая кластерная подструктура типа стохастизированных биений.

ЧВМ сеансов работы системы связи с ППРЧ не могут быть идентифицированы как достаточно близкие к стохастической модели гауссова шума. В частности, приведенный на рис. 3 сеанс работы системы связи с ППРЧ может быть отнесен к системам с динамическим хаосом, достаточно близким к модели Энона.

Выводы по оценке соответствия на топологическом уровне структурных функций следующие:

1. Несмотря на то, что априорные принципы построения систем связи с ППРЧ предполагают использование РЧ по псевдослучайному закону, структурные функции ЧВМ реальных экспериментов нельзя отнести к стохастике.
2. Все структурные функции сеансов работы системы связи с ППРЧ на визуально-топологическом уровне занимают промежуточное положение между квазистохастическими и хаотическими моделями. Они явно не принадлежат к структурным функциям стохастических систем модели Гаусса.
3. Следует отметить явную близость структурных функций системы связи с ППРЧ к эноноподобному классу систем. Возможно допустить существование на эноноподобных системах небольшой доли квазистохастики, но только в качестве несущественной примеси.

Полученные результаты для системы связи с ППРЧ имеют кантороподобную структуру. С рассматриваемых позиций эноноподобный характер структурной организации ЧВМ сеансов системы связи с ППРЧ позволяет допустить концепцию динамического хаоса. И с этих позиций видимо можно допустить возможность фрактальной организации ансамбля ЧВМ [7].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Борисов В.И.* Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты. – М.: Радио и связь, 2000. – 384 с.
2. Современная радиоэлектронная борьба. Вопросы методологии / Под ред. Радзиевского В.Г. – М.: Радиотехника, 2006. – 424 с.
3. *Юдин В.В., Перерва Л.М., Золотых В.Г., Пащенко М.С., Титов П.Л.* Численное моделирование процесса эксплуатации частотного ресурса системы с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты // Вестник тихоокеанского государственного университета: научный журнал. – Хабаровск: ТОГУ, 2010. – № 1 (16). – С. 19-26.
4. Прикладной анализ случайных процессов / Под ред. Прохорова С.А. – СНЦ РАН, 2007. – 582 с.
5. *Юдин В.В.* Стохастическая магнитная структура пленок с микропоровой системой. – М.: Наука, 1987. – 216 с.
6. *Дженкинс Г., Ваттс Д.* Спектральный анализ и его приложения. – Вып. 1. – М.: Мир, 1971. – 320 с.
7. *Перерва Л.М., Юдин В.В., Гряник В.Н., Золотых В.Г., Пащенко М.С.* Фрактальность апостериорной ЧВМ функционирования системы связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты // Радиолокация, навигация, связь: Сборник научных трудов XVI Международной научно-технической конференции. – Воронеж, 2010. – Т. 2. – С. 952-962.

Статью рекомендовал к опубликованию профессор В.В. Юдин.

Золотых Вячеслав Григорьевич

Тихоокеанский военно-морской институт им. С.О. Макарова.

E-mail: slzol@mail.ru.

690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6.

Тел.: 89644307847.

Пашенко Михаил Сергеевич

E-mail: nik1316@yandex.ru.

Тел.: +79147007443.

Перерва Лариса Михайловна

E-mail: lpererva@offs.dvgu.ru.

Тел.: 84232436508.

Юдин Виталий Витальевич

Дальневосточный государственный университет.

E-mail: yudinvv@mail.ru.

690950, г. Владивосток, ул. Суханова, 8.

Тел.: 84232314237.

Zolotykh Vyacheslav Grigoryevich

S.O. Makarov Pacific Navy Institute.

6, Kamskiy Lane, Vladivostok, 690062, Russia.

E-mail: slzol@mail.ru.

Phone: +79644307847.

Paschenko Mikhail Sergeevich

E-mail: nik1316@yandex.ru.

Phone: +79147007443.

Pererva Larisa Mikhailovna

E-mail: lpererva@offs.dvgu.ru.

Phone: +74232436508.

Yudin Vitaliy Vitalyevich

Far Eastern National University.

E-mail: yudinvv@mail.ru.

8, Sukhanova Street, Vladivostok, 690950, Russia.

Phone: +74232314237.

УДК 621.372.54

В.П. Тепин, А.В. Тепин

**ПРОГРАММИРУЕМЫЕ ЦИФРОВЫЕ ФИЛЬТРЫ: СИНТЕЗ ЗАКОНОВ
УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИЕЙ**

Рассматривается проблема управления частотой настройки рекурсивного цифрового фильтра произвольного класса и порядка. Анализируются три метода управления: а) прямой, основанный на изменении частоты дискретизации; б) косвенный, базирующийся на управлении коэффициентами передаточной функции без изменения частоты дискретизации; в) комбинированный. Решается задача синтеза законов преобразования передаточной функции, гарантирующих управление частотой настройки прямым и косвенным методами, а также задача синтеза законов управления коэффициентами передаточной функции для косвенного метода. Анализируется точность косвенного метода, и даются рекомендации по ее повышению. Приводятся примеры.

Рекурсивный цифровой фильтр; программирование частоты настройки; прямой и косвенный методы управления; законы управления.