

# Модели спектральной плотности мощности фликкер-шумов

Борисов Б.Д.

Институт лазерной физики РАН, 630090, Новосибирск, просп. Лаврентьева 13/3

**Аннотация:** Рассмотрены модели спектральной плотности мощности (СПМ) специфических шумов фликкерного типа с неинтегрируемыми СПМ. Флуктуации такого типа наблюдаются в физических экспериментах и устройствах, в природных и технических объектах исследований. Предложены физически реалистичные, с конечной мощностью модели СПМ фликкер-шумов и пример их использования.

**Ключевые слова:** флуктуации, фликкер-шумы, спектральная плотность мощности, модели

## 1. ФЛИККЕР - ШУМЫ

Особое место при измерениях частоты или характеристик ее нестабильности занимают так называемые фликкер или избыточные (технические) шумы, спектральная плотность мощности (СПМ) которых подчинена степенному закону

$$S(\omega) = h_\gamma \omega^\gamma, \quad -2 \leq \gamma \leq 2, \quad (1)$$

$h_\gamma$  — масштабный коэффициент, определяющий уровень шума.

Этот шум, например, может быть мультипликативным и модулировать частоту высокостабильных генераторов любого диапазона. Традиционно с каждым целочисленным значением  $\gamma$  связан определенный “тип” шума: частотный шум случайных блужданий ( $\gamma = -2$ ), частотный фликкер-шум ( $\gamma = -1$ ), белый частотный шум ( $\gamma = 0$ ), фазовый фликкер-шум ( $\gamma = +1$ ), белый фазовый шум ( $\gamma = +2$ ) [1].

Их характерным отличием является то, что дисперсия шума

$$\sigma_f^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty S(\omega) \cdot |H(\omega)|^2 d\omega, \quad (2)$$

где  $|H(\omega)|^2$  — квадрат модуля передаточной функции измерителя,

избыточна — превышает уровни теплового и дробового шумов — и ограничивает точность измерений на их фоне. Подобный тип шумов наблюдается в природе и технике, в т.ч. физическом эксперименте [1–4]. Они проявляются, в основном, в электронных компонентах схем — угольных компандрах

резисторов [4], конденсаторах [5], вакуумных приборах [6], твердотельных элементах — транзисторах и диодах [7,8, 9]. В стабильных генераторах фликкер шумы вызывают уширение линии — репера и соответствующий сдвиг частоты, а также другие эффекты [10, 11, 12, 13, 14].

Исследования статистических свойств фликкер-шумов проводилось как моделированием, в т.ч. физическим [6, 19] и математическим [20, 21], так и в натурном экспериментах [12], где наблюдения на интервалах  $T = 10^5 \div 10^7$  сек, т.е. до инфранизких компонент  $10^{-5} \div 10^{-7}$  Гц, не выявили отклонения от закона (1), в частности, для шума  $1/\omega$ . Основной проблемой при этом являлось выяснение стационарности или нестационарности фликкер-шумов [19, 20, 21, 22, 23, 24]. Это определяет учет условий измерения частоты и выбор соответствующей методики измерений. Дискуссия по этой проблеме [24, 25], в частности, для частотного фликкер-шума с  $\gamma = -1$ , являющегося в каком-то смысле граничным, т.к. он расходится на обоих пределах, показала, что низкочастотная расходимость характеризуется условием  $\gamma \leq -1$ . Высокочастотную расходимость можно не принимать во внимание для аналитических решений, т.к. любая физическая система диссипирует пропускание высоких частот и бесконечной энергии на них не может существовать. Это позволяет вводить, в частности при  $\gamma = +1, 2$ , для получения реальных оценок верхнюю граничную частоту  $\omega_b$ . Зависимость мощности низкочастотных шумов от времени в этом случае пропорциональна  $\ln T$  — медленно (медленней, чем  $T$ ) растущей функции времени измерения [28]. Здесь принято говорить о слабой стационарности  $1/\omega$  шума. Другие источники [20] связывают изменения дисперсии фликкер-шума в сравнении с белым шумом только с самой формой СПМ или обосновывают стационарные модели фликкер-шумов [21, 24], в частности, по таким признакам, как стационарность разностей этого шумового процесса или обратной зависимостью дисперсии мощности (дисперсии) шума от времени измерения, либо сильным ослаблением зависимости от времени для узкополосных процессов, что характерно для сигналов

высокомонохроматичных генераторов. Одна из последних работ в этой области объясняет физические механизмы аномального поведения спектра мощности  $1/\omega$  – шума, с учетом которых СПМ оказывается ограниченной и интегрируемой и отвечает физическим представлениям о шумах [26]. Кажущаяся же аномалия является виртуальной и связана с практической недостижимостью в эксперименте краев  $1/\omega$  спектра, что вызвано только ограниченностью времени наблюдения.

## 2. РЕАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Реальная система на измерительном интервале  $T$  “не видит” частот, меньших  $1/T$ , и для СПМ  $1/\omega$  при  $T_H > T$  и  $\gamma = 1$  (где  $T_H$  – общее время наблюдения) оценка измеряемого параметра  $\lambda^*$  будет несостоятельна, т.е. при любом малом  $\varepsilon$

$$\lim_{T \rightarrow \infty} P\left\{|\lambda - \lambda^*| \geq \varepsilon\right\} \neq 0. \quad (3)$$

Это качество оценки в реальном эксперименте, как правило, не учитывается, однако оно означает, что измерения частоты любым прибором на фоне “идеального” фликкер – шума, не имеющего конечного значения СПМ на нулевой частоте, будут иметь разброс, величина которого растет с ростом  $T_H$  [4]. Это формальное, вытекающее из свойств идеальной,  $1/\omega$ , модели, заключение является ее главным недостатком. Для снижения этого эффекта, конечно, можно усреднить по ансамблю  $N$  отрезков длительностью  $T_H/N$  каждый, полученных из реализации сигнала, и уменьшить в  $\sqrt{N}$  величину разброса, что лишь ослабит эффект.

Однако, для оптимизации реальных измерений нужна физически реалистичная модель фликкер – шума с конечной мощностью и существующей корреляционной функцией, сохраняющая его основные свойства в рабочей полосе частот СПМ.

## 3. МОДЕЛИ СПМ

В качестве такой модели предложим модель стационарного частотного фликкер – шума с дробно – рациональным спектром вида

$$S(\omega) = \frac{\sigma_f^2(a + \omega)}{a^2 + \omega^2} = \sigma_f^2 \left[ \frac{a}{a^2 + \omega^2} + \frac{\omega}{a^2 + \omega^2} \right], \quad (4)$$

где  $a$  – неопределенная пока величина,  $\sigma_f^2$  – дисперсия флуктуаций  $f(t)$ . Значения этой СПМ в области нулевых частот  $0 < \omega < a$  определяются в основном первым членом в квадратных скобках, Фурье – образ которого

$R(\tau) = \exp(-a|\tau|)$  определяет конечную мощность  $\sigma_f^2 R(0)$ . В области частот  $\omega > a$  превалирует второй член, который хорошо воспроизводит закон  $1/\omega$  для всех частот  $\omega \geq a$  (Рис. 1). При  $0 < a < 1$  модель хорошо отражает вклад низкочастотных компонент шума в СПМ.

Как выбрать  $a$  для реальной измерительной системы? Практическую оценку можно получить, используя соотношение  $aT_H = 1$ . Длительность общего времени измерения  $T_H$  определим тогда через  $T_{\max}$  – длительность максимального интервала одного измерения и  $N$  – число статистических выборок (отсчетов). Тогда

$$\hat{a} \cong 1/NT_{\max} \ll 1. \quad (5)$$

В отличие от идеальной модели, Фурье – образ (4) существует и равен [27]

$$R(\tau) = \pi e^{-a|\tau|} - \frac{1}{2} \left[ e^{-a|\tau|} \bar{E}i(a\tau) + e^{a|\tau|} Ei(-a\tau) \right], \quad (6)$$

где  $\bar{E}i$  и  $Ei$  – модифицированная и обычная интегральные показательные функции. Учтем аппроксимацию  $Ei, \bar{E}i$  в (6) и  $\ln$  в (7) первыми членами ряда и запишем (6) в виде

$$R(\tau) = \pi \cdot e^{-a|\tau|} - c - \ln a\tau \approx \approx \pi e^{-a|\tau|} - a\tau + 0.42, \quad (7)$$

здесь  $c$  – постоянная Эйлера. Корреляционная функция (7) существует, физически реалистична и может использоваться для оценки статистической точности измерений на фоне частотных фликкер – шумов в стационарном приближении.

Отметим, что модели СПМ стационарных фликкер – шумов общего вида

$$S(\omega) = \frac{h_\gamma}{a^\gamma + |\omega^\gamma|} \quad (8)$$

рассматривались и ранее [4, 21, 29, 30]. Они обязательно содержат некоторую нижнюю граничную частоту  $a$ , на которой существует «полка» – конечное значение в СПМ, и сохраняют основное свойство фликкер – шумов – рост СПМ при уменьшении спектральной частоты до  $a$ . Феноменологически наша модель (4) совпадает с выводами математической теории [26] и близка к модели [30], но, в отличие от последней, представлена в более простой, дробно – рациональной форме и не содержит специальных функций. На Рис. 1 приведены графики СПМ для идеальной  $1/\omega$  модели частотных флуктуаций и её аппроксимации (4) в широком диапазоне частот.

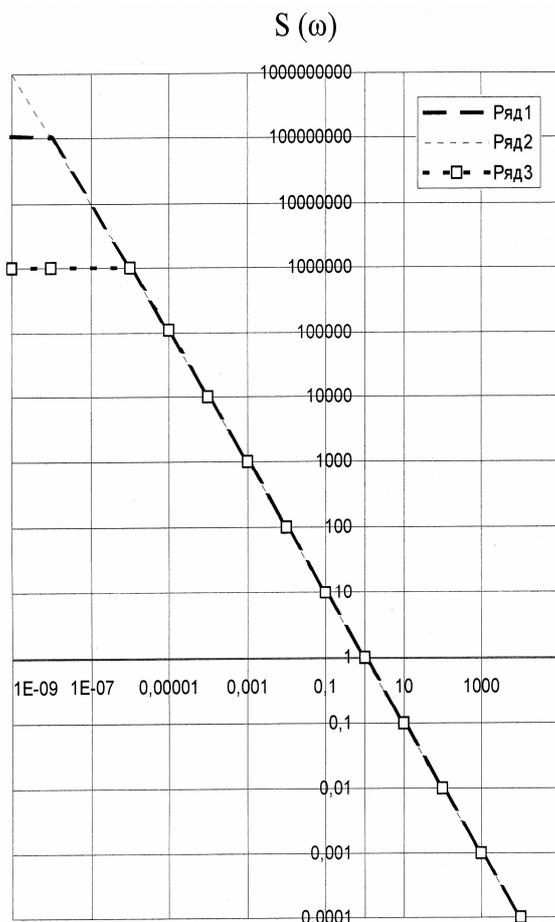


Рис. 1. Модели спектральных плотностей мощности  $S(\omega)$ : Ряд 2 – идеальная,  $1/\omega$ , нестационарного процесса, Ряд 1 – модель (4) стационарного процесса с  $a = 10^{-8}$ , Ряд 3 – модель (4) с  $a = 10^{-6}$ . Диапазон изменения по оси абсцисс  $\omega = 10^{-9}$  –  $10^{+9}$  Гц

#### 4. ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ

Применение необходимых для оптимального сглаживания частотных флуктуаций фликкерного типа моделей СПМ и соответствующих им корреляционных функций в пределах интервала  $T$  рассмотрено в [31] и даёт многократный выигрыш в точности. Степень подавления фликкер – шумов, например, при оценки средней частоты на интервале  $T$  в сравнении с измерением обычным электронно-счётным частотомером в соответствии с (2) приведена на Рис. 2.

Из Рис. 2 видно, что область эффективности оптимального сглаживания пропорциональна  $1/a$  и растёт с уменьшением  $a$  (приближением к точной модели), обеспечивая уменьшение дисперсии оценок до 3-х раз в данном примере.

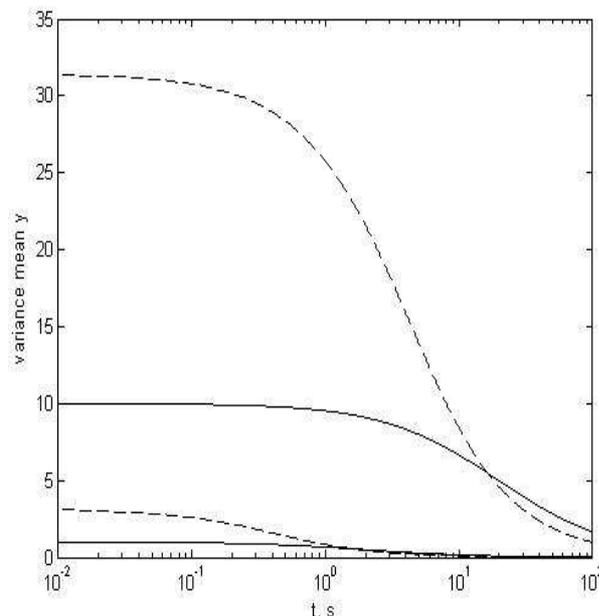


Рис. 2. Дисперсии оценок среднего значения частоты на фоне частотного шума случайных блужданий с  $\gamma = -2$  в (8); частотомером (пунктир), оптимальным сглаживанием (сплошная линия). Верхняя пара кривых для  $a = 0.1$ , нижняя пара кривых для  $a = 1$

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Идеальным моделям СПМ фликкерного типа вида  $1/\omega$  соответствует нестационарный процесс с неинтегрируемой СПМ, т.е. несуществующей корреляционной функцией. Однако оптимальные операторы сглаживания выборок сигнала на выходах частотного или фазового детекторов, особенно на фиксированном интервале времени, требуют знания таких функций. Предложенные в стационарном приближении модели СПМ являются физически реалистичными, обладают конечной мощностью и обеспечивают повышение точности оценок, в частности, при измерении нестабильности частоты в сравнении с традиционными средствами измерений на базе счётчиков.

Предложенный метод крайне актуален для повышения точности в лазерных системах высшей точности измерений, как, например, в устройствах, описанных в статьях [32–35].

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Рютман Ж. Характеристики нестабильности фазы и частоты сигналов высоко стабильных генераторов: // ТИИЭР. - 1978. Т. 66. № 9. С. 70.
- [2] Ван дер Зил. Шумы. М.: 1973.
- [3] Нарышкин А.К., Врачев Л.С. Теория низкочастотных шумов. - М.: Энергия, 1972.
- [4] Hooge F.N. 1/f Noise // Physica. 1976. V. 83. BC. № 1. P. 14.
- [5] Radeka V. 1/f noise in physical measurements // IEEE Trans. Nucl. Set.- 1969.- Vol. NS-16. NS.

- Р. 17.
- [6] *Анисимов М.П., Черевко А.Г.* Флуктуационные явления в физико-химическом эксперименте. – Новосибирск: Наука, 1986. С.113.
- [7] Шумовые и деградиационные процессы в полупроводниковых приборах // Материалы докладов международных научно – технических семинаров / МЭИ. - М., 1993 – 2000.
- [8] *Букингом М.* Шумы в электронных приборах и системах. - М.: Мир, 1986. - С. 148.
- [9] *Коган М.М.* Низкочастотный токовый шум со спектром  $1/f$  в твердых телах // УФН. 1985. Т.145. Вып. С. 285.
- [10] *Christensson E., Lundstrom L., Svensson C.* Low frequency noise in MOS transistors. II Experiments // Solid - State Electronics. 1968. Vol. 11, № 9, P. 813.
- [11] *Жигальский Г.П.* Шум вида  $1/f$  и нелинейные эффекты в тонких металлических пленках // УФН. 1997. Т. 167. Вып. 6.- С. 623.
- [12] *Троицкий С.* Некоторые вопросы теории флуктуаций в автогенераторах. Влияние фликкер шума // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1958. № 1. С. 20.
- [13] *Аткинсон, Фий, Ньюмен* Спектральный анализ чрезвычайно низкочастотных изменений частоты кварцевых генераторов // ТИИЭР, 1963. - Т. 51.- № 2. С. 413.
- [14] *Катлер, Сирл.* Некоторые аспекты теории и измерения частотных флуктуаций стандартов частоты // ТИИЭР, 1966. Т. 54. № 2. С. 41.
- [15] *Аллен Д.* Статистические характеристики атомных стандартов частоты // ТИИЭР, 1966. Т.54. № 2. С. 118.
- [16] *Мелехин Г.В. Степанов В. А. Чиркин М.В.* О механизме низкочастотных флуктуаций выходной мощности газоразрядных лазеров // Оптика и спектроскопия. 1984. Т.57. Вып.2.- С.319–324.
- [17] *Кузовлев Ю.Е., Бычков Г.Н.* К вопросу о происхождении и статистических характеристиках  $1/f$  шума // Радиофизика. 1983. Т. XXVI. № 3. С. 310.
- [18] *Паленкис В., Лаучус Ю., Миколайтис Г.* Моделирование и статистические свойства фликкерных шумов // Литовский физический сборник. 1984. XXIV. № 2.
- [19] *Brophy J.* Statistics of  $1/f$  noise // Phys Rev. 1968. V. 166. № 3. P. 827.
- [20] *Потемкин В.В., Степанов А.В.* О стационарном характере шума  $1/f$  в низкочастотном диапазоне // Радиотехника и электроника. 1980. Т. 25. № 6. С. 1269.
- [21] *Restle R.* Tests of gaussian statistical properties of  $1/f$  noise // J.Apple. Phys. 1983. 54. № 10. С. 5844.
- [22] *Рютман Ж, Юберсфельд Ж.* Модель частотного фликкер шума генераторов // ТИИЭР. 1972. Т. 60. № 2. С 101.
- [23] *Кешнер М.* Шум тапа  $1/f$  // ТИИЭР. 1982. Т. 70. № 2. С. 60.
- [24] *Стратонович Р.Л.* Негауссовы свойства фликкер - шума // ДАН. 1985. № 3. С 605.
- [25] *Малахов А.Н.* // Флуктуации в автоколебательных системах. М.: Наука. 1968. С. 660.
- [26] *Рытов С.М.* Введение в статистическую радиофизику. ч. I.- М.: Наука. 1976. С. 485.
- [27] *Бударин А.Г.* Кажущееся аномальное поведение спектра мощности  $1/f$  шума и его объяснение // Письма в ЖЭТФ. 2001. Т. 73. Вып. 12. С. 763-766.
- [28] *Градиштейн И.С., Рыжик И.М.* Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М.: Мир, 1972. С. 352.
- [29] *Григорьянц В.В., Жаботинский М.Е., Золин В.Ф.* Квантовые стандарты частоты. - М.: Наука, 1968.
- [30] *Gray R.M., Tausworthe R.C.* Frequency – counted measurements and phase – locking to noisy oscillators // IEEE Trans. Commun. Technol. – 1971. vol. COM-19. .P. 21-30.
- [31] *Борисов Б.Д.* Оптимальное сглаживание частотных флуктуаций фликкерного типа с учётом конечности интервала измерения // Автоматика и программная инженерия - Электронный журнал, 2014, № 2 (8), с. 41-45.
- [32] *Vasil'ev V.A., Zhmud' V.A., P'yanovich Yu.N., Semibalamut V.M., Fomin Yu.N.* Detection of the increment of an instantaneous phase in a long-base laser meter of small vibrations. Приборы и техника эксперимента. 2002. Т. 45. № 4. С. 97-100.
- [33] *Гончаренко А.М., Васильев В.А., Жмудь В.А.* Метод повышения чувствительности лазерных виброметров. Автометрия. 2003. Т. 39. № 2. С. 43-47.
- [34] *Жмудь В.А., Воевода А.А., Гончаренко А.М.* Многоканальный прецизионный быстродействующий частотомер. Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2005. № 1. С. 73-82
- [35] *Бугров С.В., Жмудь В.А., Прохоренко Е.В., Гончаренко А.М.* Методы и средства нановиброметрии. В сборнике: Актуальные проблемы электронного приборостроения материалы X Международная конференция: в 7 т.. 2010. С. 119-123.



**Борис Дмитриевич Борисов** – зав. лабораторией электронных лазерных систем Института лазерной физики СО РАН, д.т.н.,  
e-mail: [borisov@laser.nsc.ru](mailto:borisov@laser.nsc.ru)

## Models of the Power Spectral Density of Flicker Noise

BORIS BORISOV

*Abstract:* The paper consider the models of the power spectral density (PSD) of specific types of flicker noise with non-integrable PSD. Fluctuations of this type are observed in the physical experiments and devices, natural and technical objects of the research. The paper proposes physicaly realistic model of PSD of flicker-noises, with the ultimate power and example of their use.

*Key words:* fluctuation, flicker noise, power spectral density, model

## REFERENCES

- [1] Rjutman Zh. Charakteristiki nestabil'nosti fazy i chastoty signalov vysoko stabil'nyh generatorov: // TIIJeR. - 1978. T. 66. № 9. S. 70.
- [2] Van der Zil. Shumy. M.: 1973.
- [3] Naryshkin A.K., Vrachev L.S. Teorija nizkochastotnyh shumov. - M.: Jenergija, 1972.
- [4] Hooge F.N. 1/f Noise // Physica. 1976. V. 83. BC. № 1. P. 14.
- [5] Radeka V. 1/f noise in physical measurements // IEEE Trans. Nucl. Set.- 1969.- Vol. NS-16. NS. P. 17.
- [6] Anisimov M.P., Cherevko A.G. Fluktuacionnye javlenija v fiziko-himicheskom jeksperimente. - Novosibirsk: Nauka, 1986. S.113.
- [7] Shumovye i degradacionnye processy v poluprovodnikovyh priborah // Materialy dokladov mezhdunarodnyh nauchno – tehnikeskikh seminarov / MJeI. - M., 1993 – 2000.
- [8] Bukingem M. Shumy v jelektronnyh priborah i sistemah. - M.: Mir, 1986. - S. 148.
- [9] Kogan M.M. Nizkochastotnyj tokovyj shum so spektrom 1/f v tverdyh telah // UFN. 1985. T.145. Vyp. S. 285.
- [10] Christensson E., Lundstrom L., Svensson C. Low frequency noise in MOS transistors. II Experiments // Solid - State Electronics. 1968. Vol. 11, № 9, P. 813.
- [11] Zhigal'skij G.P. Shum vida 1/f i nelinejnye jeffekty v tonkih metallicheskikh plenkah // UFN. 1997. T. 167. Vyp. 6.- S. 623.
- [12] Troickij S. Nekotorye voprosy teorii fluktuacij v avtogeneratorah. Vlijanie flicker shuma // Izv. VUZov. Radiofizika. 1958. № 1. S. 20.
- [13] Atkinson, Fij, N'jumen Spektal'nyj analiz chrezvychajno nizkochastotnyh izmenenij chastoty kvarcevyh generatorov // TIIJeR, 1963. - T. 51.- № 2. S. 413.
- [14] Katler, Sirl. Nekotorye aspekty teorii i izmerenija chastotnyh fluktuacij standartov chastoty // TIIJeR, 1966. T. 54. № 2. S. 41.
- [15] Allen D. Statisticheskie karakteristiki atomnyh standartov chastoty // TIIJeR, 1966. T.54. № 2. S. 118.
- [16] Melehin G.V. Stepanov V. A. Chirkin M.V. O mehanizme nizkochastotnyh fluktuacij vyhodnoj moshhnosti gazorazrjadnyh lazerov // Optika i spektroskopija. 1984. T.57. Vyp.2.- S.319–324.
- [17] Kuzovlev Ju.E., Bychkov G.N. K voprosu o proishozhdenii i statisticheskikh karakteristikah 1/f shuma // Radiofizika. 1983. T. XXVI. № 3. S. 310.
- [18] Palenskis V., Lauchus Ju., Mikolajtis G. Modelirovanie i statisticheskie svojstva flickernykh shumov // Litovskij fizicheskij sbornik. 1984. XXIV. № 2.
- [19] Brophy J. Statistics of 1/f noise // Phys Rev. 1968. V. 166. № 3. P. 827.
- [20] Potemkin V.V., Stepanov A.V. O stacionarnom karaktere shuma 1/f v nizkochastotnom diapazone // Radiotekhnika i jelektronika. 1980. T. 25. № 6. S. 1269.
- [21] Restle R. Tests of gaussian statistical properties of 1/f noise // J.Apple. Phys. 1983. 54. № 10. S. 5844.
- [22] Rjutman Zh, Jubersfel'd Zh. Model' chastotnogo flicker shuma generatorov // TIIJeR. 1972. T. 60. № 2. S 101.
- [23] Keshner M. Shum tapa 1/f // TIIJeR. 1982. T. 70. № 2. S. 60.
- [24] Stratonovich R.L. Negausovy svojstva flicker - shuma // DAH. 1985. № 3. S 605.
- [25] Malahov A.N. // Fluktuacii v avtokolebatel'nyh sistemah. M.: Nauka. 1968. S. 660.
- [26] Rytov S.M. Vvedenie v statisticheskiju radiofiziku. ch. I.- M.: Nauka. 1976. S. 485.
- [27] Budarin A.G. Kazhushheesja anomal'noe povedenie spektra moshhnosti 1/f shuma i ego ob#jasnenie // Pis'ma v ZhJeTF. 2001. T. 73. Vyp. 12. S. 763-766.
- [28] Gradshtejn I.S., Ryzhik I.M. Tablicy integralov, summ, rjadov i proizvedenij. M.: Mir, 1972. S. 352.
- [29] Grigor'janc V.V., Zhabotinskij M.E., Zolin V.F. Kvantovye standarty chastoty. - M.: Nauka, 1968.
- [30] Gray R.M., Tausworthe R.C. Frequency – counted measurements and phase – locking to noisy oscillators // IEEE Trans. Commun. Technol. – 1971. vol. COM-19. P. 21-30.
- [31] Borisov B.D. Optimal'noe sglazhivanie chastotnyh fluktuacij flickernogo tipa s uchjotom konechnosti intervala izmerenija // Avtomatika i programnaja inzhenerija - Jelektronnyj zhurnal, 2014, № 2 (8), s. 41-45.
- [32] Vasil'ev V.A., Zhmud' V.A., Il'yanovich Yu.N., Semibalamut V.M., Fomin Yu.N. Detection of the increment of an instantaneous phase in a long-base laser meter of small vibrations. Pribory i tehnika jeksperimenta. 2002. T. 45. № 4. S. 97-100.
- [33] Goncharenko A.M., Vasil'ev V.A., Zhmud' V.A. Metod povyshenija chuvstvitel'nosti lazernykh vibrometrov. Avtometrija. 2003. T. 39. № 2. S. 43-47.
- [34] Zhmud' V.A., Voevoda A.A., Goncharenko A.M. Mnogokanal'nyj precizionnyj bystrodej-stvuju-shhij chastotomer. Nauchnyj vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta. 2005. № 1. S. 73-82
- [35] Bugrov S.V., Zhmud' V.A., Prohorenko E.V., Goncharenko A.M. Metody i sredstva nanovibrometrii. V sbornike: Aktual'nye problemy jelektronnogo priborostro-enija materialy X Mezhdunarodnaja konferencija: v 7 t. 2010. S. 119-123.