

УДК 621.391.26

С.С. Шибяев

**АКУСТООПТИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ПАРАМЕТРОВ
РАДИОСИГНАЛОВ ПРЕДЕЛЬНО КОРОТКОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ**

Рассмотрены особенности функционирования акустооптического приемника-частотомера (АОПЧ) в условиях приема и измерения параметров радиосигналов сверхкороткой длительности. Изложены результаты теоретического и экспериментального исследования такого АО измерителя (АОИ). Показано, что при прохождении таких сигналов по апертуре акустооптического дефлектора последняя становится настолько малой, что пучок от источника опорного когерентного излучения испытывает дифракцию на такой «щели». Данный факт без принятия специальных мер приводит к серьезным последствиям, выражающимся в снижении технических параметров АОИ. Эти изменения сказываются на таких важных параметрах АОИ, как чувствительность, динамический диапазон, разрешающая способность. На основе проведенных исследований даются рекомендации по улучшению характеристик измерителя и излагаются способы, направленные на обеспечение требуемых технических параметров. Эти рекомендации охватывают практически все составные элементы измерителя, начиная от лазера и дефлектора и заканчивая усилительным трактом и обработкой оцифрованного сигнала.

Акустооптический; измеритель; частотомер; радиосигнал; предельно короткая длительность.

S.S. Shibaev

**ACOUSTOOPTIC MEASURER OF EXTREMELY SHORT WIDTH
RADIOSIGNALS PARAMETERS**

Features of acoustooptic (AO) receiver-cymometer operation in conditions of receiving and measuring parameters of super short width radiosignals are considered. Results of theoretic and experimental study of such AO measurer are stated. Shown that at passing such the signals through acoustooptic deflector aperture the last one gets so small, that laser beam suffers diffraction on such slit. Given fact, without special measures, can result in serious consequences, expressing in technical parameters decrease. These changes affect on such important measurer parameters as sensitivity, dynamic range, resolution. On the base of carried out researches the recommendations on improvement of the measurer characteristics are given and the ways of ensuring needed technical parameters are recited. These recommendations cover practically all measurer components, beginning with laser and deflector, ending in amplifying section and digital signal processing.

Acoustooptic; measurer; radiosignals; cymometer; extremely short width.

Введение. В настоящее время прогресс в области разработки пассивных цифровых средств измерения параметров радиосигналов очевиден. Но по целому ряду параметров альтернативные принципы построения указанных измерителей, в частности акустооптические, остаются вполне конкурентоспособными, при условии, что АОИ также продолжают свое развитие. Их совершенствование может идти по нескольким направлениям, главными из которых являются: расширение рабочих диапазонов частот, повышение точности измерений, увеличение динамического диапазона и чувствительности. Такое развитие приобретает дополнительный импульс также и благодаря ряду свежих идей. Например, в [1–3] описаны способы вариации и расширения полосы рабочих частот АОИ, в [4] дается вариант увеличения разрешающей способности АО измерителя, а [5, 6] предлагают «рабочие» и используемые на практике алгоритмы более точного измерения несущих частот обрабатываемых радиосигналов.

В настоящей статье рассматриваются проблемы приема и измерения сигналов крайне короткой длительности и предъявляются требования к элементной базе измерителя.

Особенности АО обработки радиосигналов короткой длительности. Для лучшего понимания этих особенностей в АОИ рассмотрим формирование распределения интенсивности света в плоскости расположения чувствительных элементов фотоприемного устройства (ФПУ). Схема измерителя в нашем случае ничем не отличается от описанной в [7].

Спектр $S_o(\nu)$ светового сигнала на выходе из акустооптического дефлектора (АОД) в случае малой дифракционной эффективности [8] определяется сверткой функции $S_i(\nu)H(\nu)$, где $S_i(\nu)$ – спектр падающего на АОД света, $H(\nu)$ – передаточная функция дефлектора и функции $P(\nu)$, являющиеся спектром апертурной функции дефлектора.

В нашем случае на АОД воздействует гауссов пучок с амплитудным распределением $s_i(x) = A_0 \exp(-x^2/r_0^2)$ (A_0 – амплитуда на оси пучка, r_0 – полуширина пучка по уровню $1/e$). Будем также считать, что качество источника (инжекционного лазера) света ограничивается лишь дифракционным пределом, а расходимость падающего на АОД пучка достаточно мала для того, чтобы можно было положить $H(\nu) \equiv 1$.

Апертурную функцию АОД при его работе с короткими прямоугольными радиоимпульсами длительностью τ можно определить как $\sqrt{\eta} \text{rect}[x/d(\tau)]$, где $d(\tau) = V\tau$ – пространственная протяженность импульса в кристалле АОД, V – скорость ультразвука, η – эффективность дифракции. В этом случае $P(\nu) = \sqrt{\eta} \cdot d(\tau) \text{sinc}[d(\tau)\nu]$, где $\text{sinc}(x) \equiv \sin(\pi x)/\pi x$. Тогда

$$S_o(\nu) = S_i(\nu) * P(\nu) = \sqrt{\pi\eta} A_0 r_0 d(\tau) \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-\pi^2 r_0^2 \xi^2) \sin c[d(\tau)(\nu - \xi)] d\xi. \quad (1)$$

Амплитудное распределение света в плоскости изображения объектива, где расположен фотоприемник, с точностью до фазового множителя совпадает с Фурье-образом светового поля на выходе из АОД [9]:

$$u(x) = (j\lambda F)^{-1} \exp[j\pi(1 - z_0/F)x^2/\lambda F] S_o(x/\lambda F), \quad (2)$$

где λ – длина волны света, F – фокусное расстояние объектива, z_0 – расстояние между АОД и объективом.

Таким образом, распределение интенсивности света в фокальной плоскости линзы описывается выражением

$$I_1(x, \tau) = \pi\eta \frac{A_0^2 r_0^2}{\lambda^2 F^2} d^2(\tau) \left| \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-\pi^2 r_0^2 \xi^2) \sin c[d(\tau)(x/\lambda F - \xi)] d\xi \right|^2. \quad (3)$$

Нормированную интенсивность с учетом возможного усиления сигнала определим как:

$$I_{20}(x, \tau) = \frac{I_1(x, \tau)}{I_1(0, \tau)} 10^{0.1G}, \quad (4)$$

где G – коэффициент усиления в дБ, так что при $G = 0$ дБ $I_{20}(0, \tau) = 1$ (это значение примем за исходное).

На рис. 1 приведены рассчитанные по формуле (4) зависимости, характеризующие распределение интенсивности в фокальной плоскости Фурье-объектива при различных G для следующих исходных данных: $\tau = 70$ нс, $\lambda = 0,657$ мкм, $F = 105$ мм, $V = 3600$ м/с, $2r_0 = 4$ мм. Уровень боковых лепестков составляет $\sim(-13)$ дБ от максимума.

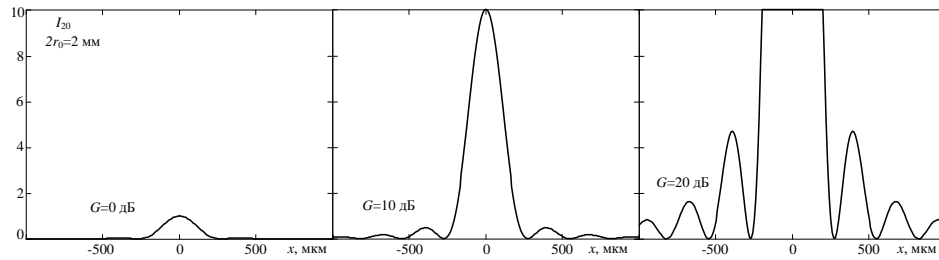


Рис. 1. Расчетные спектральные кривые АОИ

На рис. 2 приведены аналогичные экспериментальные спектрограммы, демонстрирующие хорошее соответствие расчетным и на которых масштаб горизонтальной оси составляет 15 МГц/дел.

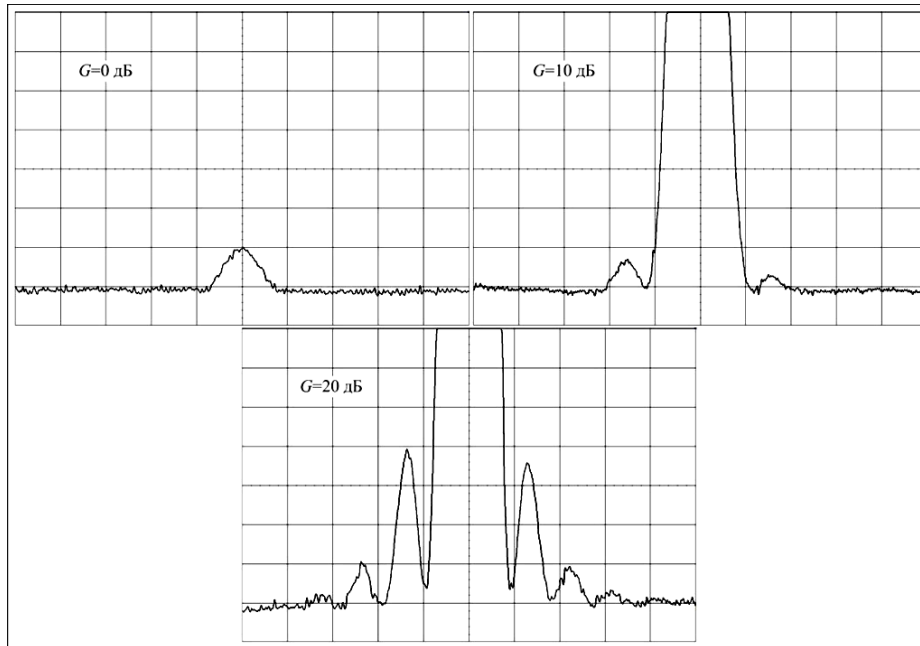


Рис. 2. Экспериментальные спектрограммы АОИ

Спектрограммы приведены для различных величин G мощности входного СВЧ-сигнала.

Как видно из этих рисунков, главной особенностью является наличие в распределениях явно выраженных боковых лепестков, что помимо ограничения динамического диапазона АОИ является мешающим фактором для самого процесса обработки и измерения параметров сигналов.

Что касается чувствительности измерителя, то она довольно сильно зависит от длительности радиоимпульса, что демонстрируется рис. 3.

Так, при изменении длительности в 10 раз (от 100 до 1000 нс) чувствительность АОИ изменяется на 20 дБ, что объясняется не только пропорциональным изменением пиковой энергии световых импульсов, но и соответствующим изменением ширины (расплыванием) распределения интенсивности в плоскости фотоприемника.

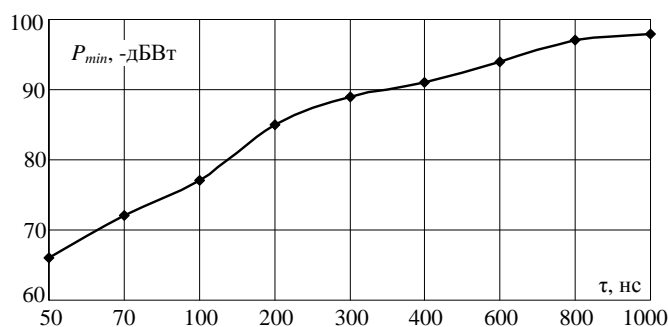


Рис. 3. Чувствительность АОИ

Отметим, что для формирования коротких радиоимпульсов при проведении экспериментального исследования был разработан модулятор, построенный по двухкаскадной схеме; в состав каждого каскада входит оптронная развязка, драйвер для формирования окончательных сигналов и СВЧ-коммутатор. На СВЧ-вход модулятора подавался непрерывный сигнал от генератора, а на вход управления – сигнал от источника ТТЛ видеоимпульсов требуемой длительности.

Рекомендации по улучшению параметров измерителя.

Способами улучшения параметров АОИ в условиях обработки радиоимпульсов короткой длительности могут являться:

- 1) применение высококачественных (дифракционно-ограниченных) источников излучения, а также использование лазеров с большей интенсивностью излучения;
- 2) улучшение качества оптической схемы и просветление оптических элементов;
- 3) формирование светового пучка с размерами, соответствующими временной апертуре АОД;
- 4) применение специализированных ограничительных малошумящих СВЧ-усилителей с высоким усилением;
- 5) стремление к увеличению эффективности АОД и переход к использованию дефлекторов, рассчитанных на более коротковолновое оптическое излучение;
- 6) использование более чувствительных фотоприемников.

Рассмотрим некоторые из этих способов более детально.

Формирование светового пучка. Как было указано, одним из способов уменьшения влияния боковых лепестков светового распределения на динамику и на процесс измерения является формирование апертуры воздействующего на АОД пучка требуемых размеров, соответствующих пространственной протяженности акустического импульса в кристалле дефлектора. Для этого можно использовать дополнительную двухэлементную коллимирующую оптическую систему с соответствующим коэффициентом преобразования (уменьшения) размеров пучка.

На рис. 4 представлены результаты численного моделирования наличия такого коллиматора.

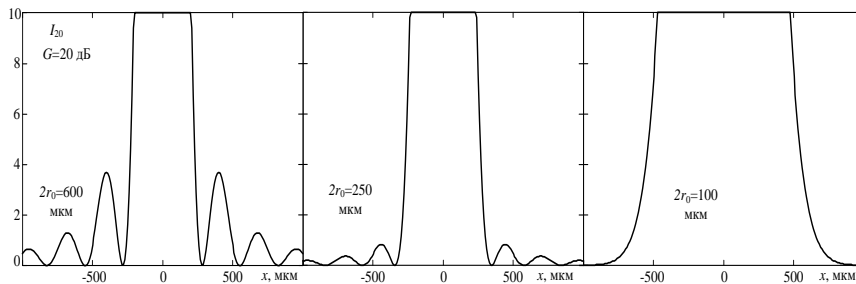


Рис. 4. Влияние апертуры светового пучка на спектр АОИ

На рисунке показаны кривые распределения интенсивности в плоскости ФПУ при различных величинах ширины гауссова пучка $2r_0$ по уровню интенсивности $1/e^2$ при фиксированном $G=20$ дБ: при уменьшенном в несколько раз по сравнению с исходным размером (4 мм) $2r_0 = 600$ мкм, при размере пучка, соответствующему пространственной протяженности импульса длительностью 70 нс в кристалле АОД – $2r_0 = 250$ мкм и при $2r_0 = 100$ мкм.

Подавление боковых лепестков светового распределения составило в этих случаях, соответственно 14, 21 и 30 дБ.

Качество оптических элементов. С целью повышения эффективности оптической системы АОИ приняты следующие меры:

1. Проведены исследования и получены практические результаты по повышению качества просветления рабочих граней АОД на основе кристалла ниобата лития. Отсутствие просветляющих покрытий приводит к потерям на отражение от каждой грани на длине волны 0,657 мкм порядка 15,2 %. Просветление рабочих поверхностей кристалла с помощью пленок из SiO_2 позволяет уменьшить потери от каждой грани в 4,5 раза.

Просветление рабочих поверхностей увеличивает светопропускание кристалла на длине волны 0,657 мкм от 68 до 95 %.

2. Для сокращения количества оптических поверхностей проводятся работы по объединению нескольких оптических деталей, стоящих за АОД, в одну.

Использование специализированных усилителей. Еще одним способом борьбы с боковыми лепестками, помимо формирования пучка нужной апертуры, является выбор усилительного тракта таким образом, чтобы он работал в широком динамическом диапазоне входных сигналов и формировал выходной сигнал с уровнем, не превышающим определенной величины (как показали численный и натуральный эксперименты, эта величина при $\tau = 70$ нс составляет порядка 100 мВт).

Такое устройство можно сформировать, используя усилитель-ограничитель. Для возбуждения усилителя-ограничителя необходим входной маломощный усилитель (МШУ), выходная мощность которого не превышает допустимый входной уровень окончательного каскада.

Таким образом, структурная схема СВЧ-тракта АОИ принимает вид, показанный на рис. 5.

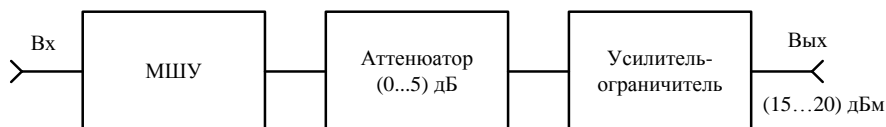


Рис. 5. Схема СВЧ тракта АОИ

Способы улучшения параметров АОД. В разрабатываемых АО измерителях используются, в основном, АОД с поверхностным возбуждением ультразвука. Исходя из особенностей преобразователей АОД такого типа, можно обозначить некоторые пути увеличения дифракционной эффективности, а именно, просветление рабочих граней и изменение геометрии светозвукопровода АОД; изменение параметров и конфигурации встречно-штыревого преобразователя (ВШП).

В используемых АОД с встречно-штыревым преобразователем оптическое излучение падает на входную грань под углом около 17° . При этом отражается около 20 % падающего света (на длине волны 0,657 мкм). Использование просветляющего покрытия, как было показано выше, позволяет до некоторой степени снизить потери на отражение.

Если, наряду с просветлением, изменить геометрию светозвукопровода АОД, как показано на рис. 6, добившись практически нормального падения света на входную грань АОД, можно получить величину коэффициента отражения от входной грани менее 1 %.

Увеличения дифракционной эффективности η АОД можно добиться и путем увеличения числа электродов N ВШП, так как $\eta \sim N$, но при этом происходит уменьшение полосы рабочих частот. Сохранить же полосу рабочих частот или даже расширить ее можно путем изменения закона сканирования главного лепестка диаграммы направленности акустического поля с изменением частоты сигнала. Последнее возможно, если изменить конфигурацию электродов ВШП, разместив его на сферической или цилиндрической поверхности. Такой способ теоретически недостаточно исследован, поэтому в настоящее время его практическая реализация затруднительна.

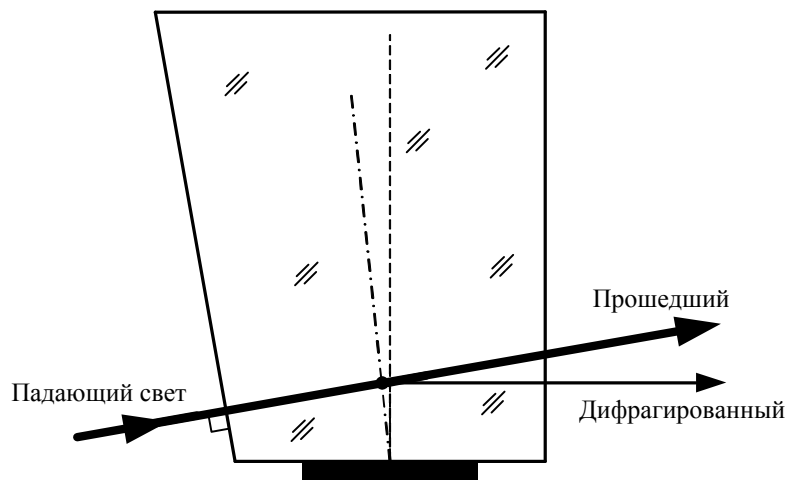


Рис. 6. Оптимальная геометрия АОД

Более реалистичным вариантом увеличения дифракционной эффективности АОД является уменьшение длины волны участвующего в дифракции оптического излучения. Используемые в настоящее время в составе АОП лазерные модули имеют длину волны излучения 0,657 мкм. Фирмы-производители лазерных модулей предлагают источники и с меньшей длиной волны: 0,532 мкм (зеленый) и 0,473 мкм (синий). Можно показать, что использование такого лазера приводит к двукратному (для 0,532 мкм) и почти трехкратному (для 0,473 мкм) увеличению эффективности.

Все рассмотренные варианты увеличения эффективности АОД вполне реализуемы на практике, однако одним из наиболее доступных является использование лазера с меньшей длиной волны излучения, поэтому рассмотрим его подробнее.

Период расположения электродов ВШП d зависит от длины волны оптического излучения λ согласно выражению $d(\lambda) = V^2 n / f_0^2 \lambda$, где f_0 – центральная частота АОД; n – показатель преломления кристалла. При $f_0 = 1750$ МГц, $V = 3590$ м/с, $n = 2,3$ и $\lambda = 0,532$ мкм получаем $d = 18$ мкм (для излучения с длиной волны $0,657$ мкм, $d = 15$ мкм).

Оставляя число электродов ВШП прежним и равным 76 (для сохранения величины статической емкости системы электродов), для длины всего ВШП получаем $L = d(N - 0,5) = 18(76 - 0,5) = 1359$ мкм. Для используемого лазера ($0,657$ мкм) длина ВШП равна примерно 1200 мкм. При этом расчетное значение полосы частот АО взаимодействия, определяемое как $\Delta f = 2\sqrt{2nV/\sqrt{L\lambda}}$, не изменится, а эффективность дифракции (обратно пропорциональная кубу длины волны) увеличится почти в 2 раза.

Требования к параметрам фотоприемников. Фотоприемник является окончательным аналоговым элементом акустооптического тракта и от его возможностей зависит целый набор параметров АО измерителя: чувствительность, точность измерения частотных параметров, быстродействие.

Требованию обеспечения необходимого уровня указанных параметров призваны удовлетворить современные ПЗС и коммутируемые КМОП многоэлементные фотоприемники и цифровые камеры. В данной серии фотоприемников, обеспечивающих последовательное считывание световой информации, предпочтение, по нашему мнению, следует отдать линейным сенсорам и камерам таких зарубежных производителей, как «E2v», «Dalsa», «Fairchild Imaging».

Заключение. Проведенное на данном этапе рассмотрение особенностей акустооптической обработки радиосигналов короткой длительности показало, что без принятия дополнительных мер параметры АО измерителей не могут быть выдержаны на требуемом уровне.

В статье представлены основные направления улучшения параметров и характеристик акустооптических измерителей коротких радиосигналов.

Что касается практических действий, то с целью улучшения характеристик АОИ на данный момент проведены следующие мероприятия: разработан и находится в составе АОИ дефлектор, рассчитанный на длину волны $0,532$ мкм; осуществляется просветление оптических элементов; прорабатывается возможность применения МШУ и ограничительных усилителей; проводятся работы по формированию требуемых параметров лазерного пучка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шибанов С.С., Новиков В.М., Роздобудько В.В., Дмитришин А.В. Широкополосный акустооптический измеритель параметров радиосигналов // Патент России № 2367987. 2009. Бюл. № 26.
2. Новиков В.М., Роздобудько В.В., Шибанов С.С. Широкополосный акустооптический измеритель параметров радиосигналов // Патент России № 72082. 2008. Бюл. № 9.
3. Шибанов С.С. Акустооптический измеритель параметров радиосигналов // Патент России № 75761. 2008. Бюл. № 23.
4. Шибанов С.С., Новиков В.М., Роздобудько В.В. Теория акустооптического спектроанализатора с синтезированной апертурой // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2010. – Т. 13, № 1. – С. 55-60.

5. *Вольфовский Б.Н., Шибяев С.С., Роздобудько В.В.* Алгоритмы вычисления частоты в акустооптических измерителях параметров радиосигналов // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2008. – № 4. – С. 38-46.
6. *Вольфовский Б.Н., Шибяев С.С., Роздобудько В.В.* Алгоритмический способ уменьшения погрешностей в акустооптических измерителях // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2011. – № 5. – С. 51-56.
7. *Роздобудько В.В., Пелипенко М.И.* Быстродействующий измеритель параметров СВЧ-радиосигналов // Специальная техника. – 2006. – № 1. – С. 28–36.
8. *Балакиев В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е.* Физические основы акустооптики. – М.: Радио и связь, 1985. – 280 с.
9. *Гудмен Дж.* Введение в Фурье-оптику: Пер. с англ. – М.: Мир, 1970. – 364 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.И. Марчук.

Шибяев Станислав Сергеевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: sshib75@mail.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2; тел.: 88634312482; лаборатория оптоэлектроники; с.н.с.; к.т.н.

Shibaev Stanislav Sergeyevich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: sshib75@mail.ru; 2, Shevchenko, Taganrog, 347922, Russia; phone: +78634312482; laboratory of optoelectronics; senior scientist; cand. of eng. sc.

УДК 621.82: 621.397

Л.К. Самойлов, И.И. Турулин, С.А. Киракосян, А.Д. Вартеков

ПОГРЕШНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ

Частота дискретизации системы управления и контроля выбирается в результате решения прямой или обратной задачи распределения погрешностей всей системы. При решении прямой задачи выделяются погрешности устройства дискретизации и погрешности устройства восстановления. Соответственно различают частоту дискретизации с точки зрения процедуры дискретизации и процедуры восстановления. Оптимальным вариантом следует считать ситуацию, когда частота дискретизации с точки зрения процедуры дискретизации будет равна частоте дискретизации с точки зрения процедуры восстановления. Такое решение может быть найдено в итерационном цикле с перераспределением погрешностей. В статье рассматриваются составляющие погрешности восстановления, что позволит организовать такой итерационный цикл. Погрешность устройства восстановления состоит из методической погрешности восстановления, погрешности цифрового восстановления (передискретизации), погрешности экстраполяции нулевого порядка на основе ЦАП и погрешности аналоговых фильтров нижних частот. На выбор частоты дискретизации также влияют инструментальные погрешности устройства восстановления. В системах управления добавляется погрешность за счет задержки информации в устройстве восстановления. В статье рассматриваются указанные погрешности трехступенчатого устройства восстановления. Показано, что значение рабочей частоты устройства цифрового восстановления не влияет на величину методической погрешности восстановления. Увеличение рабочей частоты устройства цифрового восстановления уменьшает задержку сигнала в экстраполяторе на основе ЦАП, что косвенно снижает погрешность за счет задержки информации. Даются оценки погрешностей устройств, позволяющие выбрать требуемую частоту дискретизации.

Частота дискретизации; восстановление сигналов; запаздывание сигналов; граничная частота; системы управления.