

УДК 53.088.6 + 681.5.017

## ПРИМЕНЕНИЕ КОГЕРЕНТНЫХ РЕШЁТЧАТЫХ ФИЛЬТРОВ В ГОНИОМЕТРИИ

© В. П. Кирьянов, А. В. Кирьянов

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1  
E-mail: kiryanov@iae.nsk.su*

Показано, что применение ансамбля считывающих головок определённого формата, согласованного с параметрами измерительного раstra и матрицей индикаторных растров считывающих головок, позволяет существенно снизить искажающее действие систематической составляющей инструментальной погрешности раstra. Отмечается, что рассмотренное в предлагаемой работе конкретное техническое решение по согласованию параметров комплементарных решётчатых фильтров не является единственным для используемого раstra.

*Ключевые слова:* датчики угловых перемещений, инструментальная погрешность, неустранённая систематическая погрешность, решётчатые фильтры.

DOI: 10.15372/AUT20210605

**Введение.** Анализ технических решений по повышению точности датчиков угловых перемещений (ДУП) показал, что в таких изделиях наиболее востребованным приёмом остаётся многоголовочный метод, реализованный в том или ином исполнении. В отечественной литературе подобный приём получил название метода путевого усреднения (МПУ) [1]. В западноевропейской литературе чаще используется название мультиголовочный метод [2]. В восточноазиатских первоисточниках получило распространение название EDA-method (Equal Division Average method) [3, 4]. В последние годы там же появилось новое название: мультикомбинационный метод [5]. При этом за каждым названием понимается вполне определённое техническое воплощение процедуры считывания информации, которая показала, что даже в самых распространённых измерительных комплексах, реализующих любой из перечисленных вариантов метода, сохраняется искажающее действие систематической составляющей инструментальной погрешности ДУП, так называемой неисклѳочѳенной систематической погрешности (НСП).

Целью данной работы является демонстрация принципиальной возможности глубокого подавления искажающего вклада систематической составляющей погрешности в результатах угловых измерений, снижение остаточного вклада НСП практически до нулевого уровня за счёт реализации в структуре ДУП принципа когерентности параметров сформированных в них комплементарных решѳтчатых фильтров.

### **Тактика и стратегия повышения точности измерений в гониометрии.**

*Классический метод многоголовочного считывания информации в ДУП.* Под классическим методом многоголовочного считывания информации понимается принцип построения датчиков, характерный для МПУ. В общем виде погрешность угловых измерений ( $\delta_{mes}$ ) может быть представлена как

$$\delta_{mes} = \delta_{rst} + \delta_{ex} + \delta_{br} + \delta_q = \delta_{ins} + \delta_q, \quad (1)$$

где  $\delta_{rst}$  — погрешность изготовления измерительного раstra (ИР);  $\delta_{ex}$  — погрешность, обусловленная эксцентриситетом установки ИР на вал;  $\delta_{br}$  — погрешность, обусловленная биениями подшипников, на которые установлен вал с растром;  $\delta_q$  — погрешность

квантования. Первые две составляющие являются систематическими, а две последние — случайными. При этом первые три составляющие часто рассматривают вместе как инструментальную составляющую погрешности измерений  $\delta_{ins}$ , которая в настоящее время является наиболее значимой в общем балансе погрешностей угловых измерений. При этом погрешность изготовления ИР  $\delta_{rst}$  обусловлена неточностью формирования границ каждого штриха ИР. Совокупность регистрируемых значений погрешности формирования границ штрихов ИР образует искажающую функцию  $F_{err}$ , которая по своей природе является дискретной и периодической. Графически функцию  $F_{err}$  отображают либо в виде кривой погрешности ИР, либо в виде спектра гармоник, характеризующих данную кривую (функцию). Снижение вклада  $\delta_{ins}$  в результате измерений остаётся по-прежнему актуальной задачей гониометрии. Её решение ведётся разными путями, в том числе увеличением числа головок, одновременно считывающих информацию с ИР. В соответствии с теорией МПУ [1] две считывающие головки (СГ), установленные под углом  $180^\circ$ , производят подавление всех нечётных гармоник в спектре кривой погрешности изготовления ИР. Ансамбль из четырёх СГ, установленных с шагом  $90^\circ$ , производит подавление в спектре кривой погрешности не только всех нечётных гармоник, но и части чётных, номера которых образованы умножением числа 2 на все нечётные числа, т. е. в выходном сигнале подобного ансамбля остаётся искажающее воздействие только четвёртой и кратных ей гармоник. Так как вклад младших гармоник в спектре  $\delta_{ins}$  значителен, то в результате избирательного подавления всех нечётных и части чётных гармоник заметно снижается искажающее влияние погрешности изготовления ИР на точность преобразования угла поворота в цифровой сигнал и повышается точность измерений.

Дальнейшее удвоение числа СГ, при котором они устанавливаются с шагом  $45^\circ$ , и последующая совместная обработка выходных сигналов приводят к подавлению всех нечётных гармоник и части чётных, номера которых образованы умножением чисел 2 и 4 на все нечётные числа. В результате в выходном сигнале созданного ансамбля остаётся искажающий вклад только от 8-й и кратных ей: 16, 32, 40, 48-й и т. д. гармоник исходного спектра. Подобное (классическое) размещение СГ представлено на рис. 1, *a*. Такая реализация ДУП позволяет существенно снизить искажающий вклад  $\delta_{ins}$  в итоговый результат. Данный тезис можно проиллюстрировать на примере углового компаратора (УК) модели WMT-220 [6], созданного фирмой Heidenhain (Германия), или компаратора модели WMT-905 [7], созданного в Национальном метрологическом институте Германии (РТВ) и используемого в качестве национального эталона единицы плоского угла. Оба УК в своей основе используют запатентованную конструкцию поворотного стола, реализованного на

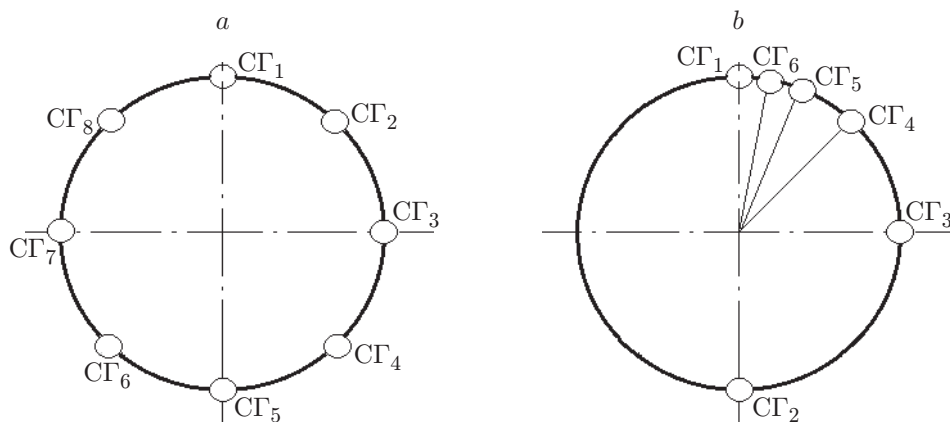


Рис. 1. Классическое размещение СГ при реализации: МПУ (*a*) и EDA (*b*)

базе аэростатического подшипника, который оснащён двумя измерительными системами (основной и вспомогательной).

Базовым элементом основной измерительной системы УК является особо точный ДУП встраиваемого типа [7]. Конструкция датчика содержит восемь фотоэлектрических СГ, установленных с шагом  $45^\circ$ , и радиально-фазовый растр диаметром 400 мм, имеющий 131 072 штриха. Погрешность нанесения штрихов в этом ИР не превышает  $\pm 0,23''$ . Каждая СГ датчика создана на базе дифракционного интерферометра и вырабатывает синусоидальные сигналы с удвоенной частотой градуировки. В головках обеспечивается дополнительная цифровая интерполяция с  $k = 4096$ . В итоге конечное разрешение измерительной системы компаратора составляет  $0,0012''$ . Результаты калибровки основной измерительной системы компаратора WMT-220, полученные в РТВ, приведены в [7]. Из них следует, что основная измерительная система УК характеризуется наличием угловых девиаций на доминирующей восьмой гармонике с амплитудой порядка  $0,01''$ . Таким образом, использование восьми СГ с шагом  $45^\circ$  позволяет снизить в компараторе WMT-220 неопределённость измерений угла с  $\pm 0,23''$  до  $\pm 0,01''$  за счёт подавления искажающего вклада семи младших гармоник и всех последующих, кратных им.

*EDA — метод многоголовочного считывания информации в ДУП.* В работе [3] был выдвинут тезис о том, что равномерное распределение СГ вдоль образующей ИР приводит к чрезмерному удорожанию и усложнению измерительного оборудования, и предложен свой метод, основанный на использовании своеобразного ансамбля СГ, размещённых таким образом, что каждая позиция установки новой головки делит угловой сектор, в котором она устанавливается, пополам. В соответствии с этим принципом новый метод получил название EDA-method. Расстановка СГ в соответствии с высказанной идеей представлена на рис. 1, *b*. В [3] установлено, что подобное размещение СГ обеспечивало подавление первых  $(2^n - 1)$  гармоник, где  $n$  — число делений угловых секторов раstra пополам. При  $n = 5$  это обеспечивало подавление первых 31-й гармоник. Но при этом сохраняется искажающее действие всех последующих чётных гармоник.

*Модифицированный МПУ в западноевропейском исполнении.* В 1994 г. фирма Heidenhain патентует своё техническое решение на нерегулярное размещение СГ. Оно позволяет повысить точность системы и оптимизировать затраты на её создание. Для этого используются дополнительные СГ [8]. Исходя из этого метода эти головки должны быть установлены только в двух из четырёх квадрантах, причём установлены попарно и диаметрально противоположно друг другу с угловыми промежутками, равными  $360^\circ/2^n$ , где  $4 \leq n \leq 7$  (рис. 2, *a*). В этом случае наименьший интервал между головками составляет  $2,8125^\circ$ . Нетрудно заметить, что третьи и особенно четвёртые деления угловых секторов приводят к чрезмерно уплотнённой группировке СГ, которая затрудняет практическое использование метода. На практике было реализовано иное размещение СГ, представленное на рис. 2, *b*, которое предполагает размещение СГ во всех квадрантах, но в соответствии с предписаниями модифицированного метода, предусматривающего нерегулярное положение некоторых СГ. Такой способ размещения головок позволяет без особых осложнений установить их в нужных позициях и обеспечить подавление вклада всех младших гармоник от 1-й до 127-й включительно, пропуская на выход 128-ю и все последующие гармоник, кратные 8.

Используя особенности конструкции поворотного стола УК, немецкие специалисты измерили значения угловой неопределённости компаратора WMT-220 в режиме работы УК с одновременным использованием всех 16 СГ. В этой конфигурации стандартное отклонение (СКО) результатов измерений не превышало  $\pm 0,001''$ . Искажающий же вклад от действия остающихся 128-й и последующих гармоник, кратных 8, составил базу для формирования НСП компараторов WMT-220 и WMT-905, которая в данных установках оценивается в пределах  $\pm 0,002''$  ( $\Delta_{pp}$ ).

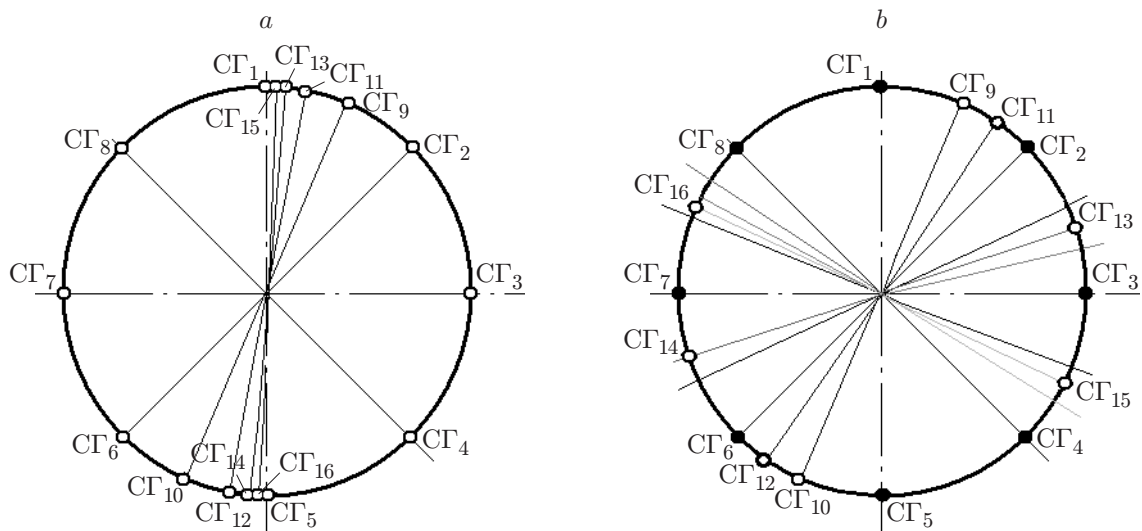


Рис. 2. Размещение СГ в полной измерительной системе компаратора WMT-220:  
 а — концептуальное размещение СГ; б — реальное размещение СГ,  
 учитывающее физические размеры головок

*Модифицированный вариант EDA-метода.* Дальнейшее развитие метода с использованием специализированных ансамблей с нерегулярным размещением СГ нашло в работах японских специалистов. В [4] показано, что эффект подавления целого набора гармоник свойствен не только ансамблю СГ, делящих углы пополам, но и делящих всю круговую шкалу на любые равные интервалы: 3, 5, 10 и т. д. Отмечено, что в этих случаях сохраняется искажающее действие гармоник с номерами, совпадающими с числом интервалов, на которые поделили весь ИР, и кратных им. При применении в УК референтного датчика модели X-1М (фирма Сапон, Япония) в исполнении с десятью СГ и ИР с числом штрихов  $N = 225\,000$  была достигнута неопределённость измерений  $\pm 0,02''$ .

Принципиально важным достижением в общей стратегии развития углоизмерительных технологий стало создание новой версии процедуры считывания, получившей название мультикомбинационного метода (Multi-Combination Method), представленного в [9–11]. Для этого метода введены такие новые понятия, как специальный набор СГ, формат ансамбля СГ, независимые наборы и сопряжённые наборы СГ.

Например, пять СГ, установленных через  $72^\circ$ , выходные сигналы которых объединены в общий сигнал, образуют специальный набор, который характеризуется появлением свойства подавления вполне определённого ряда гармоник и пропуска на выход гармоник, номера которых кратны 5. Таким же специфическим набором головок будет группа из четырёх СГ, установленных через  $90^\circ$ . Этот набор характеризуется пропуском гармоник, кратных 4. По отношению друг к другу эти два набора считаются независимыми, так как они делят шкалы на равные, но совершенно разные части. Но набор из восьми СГ, установленных через  $45^\circ$ , по отношению к набору из четырёх головок, размещённых через  $90^\circ$ , не может считаться независимым, поскольку полностью поглощает второй набор. И наконец, наборы СГ считаются сопряжёнными, если имеют по одной головке, установленной в одной общей позиции. Чаще всего такой общей позицией является  $0^\circ$ . У этого ансамбля независимых и сопряжённых наборов СГ было обнаружено свойство мультипликативности. Суть этого явления заключается в том, что если сформирован ансамбль СГ, состоящий из нескольких независимых наборов, установленных с соблюдением условия сопряжения, то такой ансамбль пропускает на выход гармоники, номера которых кратны произведению номеров гармоник, пропускаемых каждым набором в отдельности.

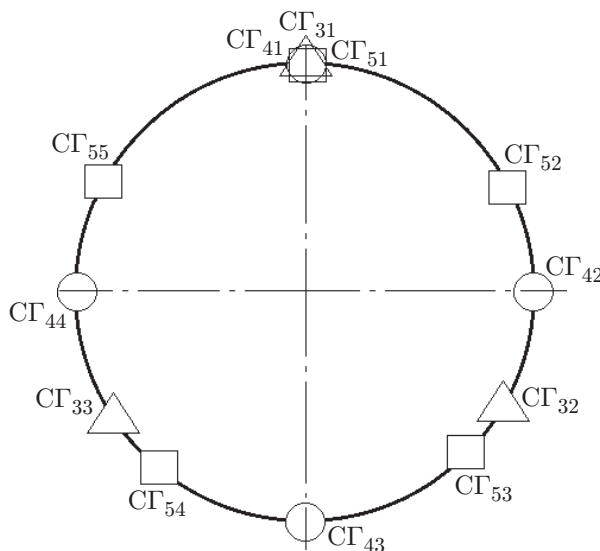


Рис. 3. Размещение СГ в ансамбле формата 345

Например, из трёх независимых наборов, содержащих 3, 4 и 5 СГ, может быть создан ансамбль головок, в котором совокупность чисел, характеризующих число головок в каждом независимом наборе, будет определять его формат. В данном случае формат создаваемого ансамбля обозначается как 345. Если в созданном ансамбле одна из СГ каждого набора установлена в общей позиции, например в  $0^\circ$ , то результатом создания такого ансамбля будет появление свойства мультипликативности, которое проявляется в том, что в суммарном выходном сигнале обнаруживаются только гармоники с номерами, кратными 60. Здесь  $60 = 3 \times 4 \times 5$ . Полезность этого свойства независимых наборов заключается в его экономической эффективности. Чтобы достичь эффекта подавления 59 младших гармоник (и последующих, кратных им) и пропуска только гармоник, кратных шестидесяти, в классическом специфическом наборе потребуется задействовать 60 СГ, размещённых равномерно по кругу через каждые  $6^\circ$ . В анализируемом же ансамбле потребуется задействовать только 10 СГ, но установленных специальным образом (рис. 3). На рисунке применена двухиндексная нумерация головок  $СГ_{ij}$ , где  $i = 3, 4, 5$  — общее число головок в наборах,  $j = 1, 2, 3, 4, 5$  — порядковый номер головки в наборе.

Применение этой методики считывания данных позволило на практике достичь существенных результатов. Так, в работе [5] представлен ДУП, созданный на основе ИР с числом штрихов  $N = 2^{21} = 2\,097\,192$  и восьми СГ, объединённых в ансамбль формата 235, обладающий погрешностью измерений порядка  $\delta = \pm 0,03''$ .

**Принцип когерентности (согласованности) параметров комплементарных решётчатых фильтров как средство дополнительного повышения точности ДУП.** Таким образом, из проведённого обзора современных методов повышения точности прецизионных угловых измерений следует, что во всех анализируемых системах сохраняется искажающее действие инструментальной погрешности, которое обуславливает формирование фундаментальной характеристики — НСП, хотя и в меньших значениях. Для сведения до пренебрежимо малых величин данной характеристики далее предлагаются иные подходы, отличные от тех, что до настоящего времени развивались в гониометрии.

*Решётчатые фильтры пропускающего типа в ДУП.* Датчики, содержащие ансамбли из  $n$  наборов, состоящие из  $k_i$  СГ, размещённых с равным шагом по образующей измерительного раstra, и выходы которых просуммированы между собой, формально можно рассматривать как своеобразные гребенчатые фильтры пропускающего типа  $k$ -го порядка.

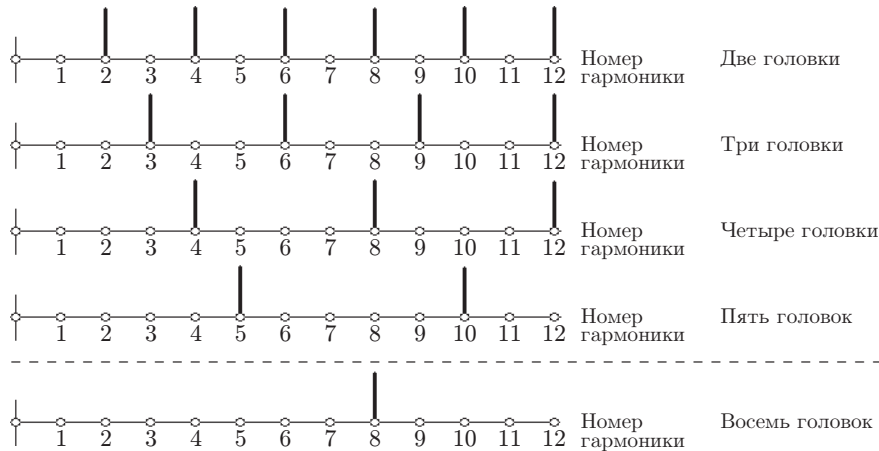


Рис. 4. Идеализированные амплитудно-частотные характеристики решётчатых фильтров на основе преобразователя с различным числом считывающих головок

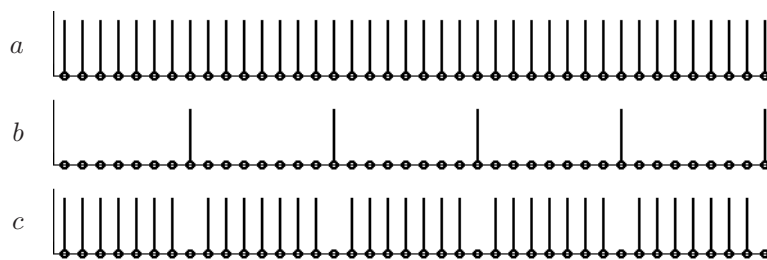


Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики решётчатых комплементарных фильтров: *a* — входной поток гармоник; *b* — АЧХ гребенчатого фильтра пропускающего типа восьмого порядка; *c* — АЧХ режекторного типа восьмого порядка

Эта возможность вытекает из способности подобных структур из общего числа поступающих на его вход гармоник выделять характерные для данного ансамбля гармоники и пропускать их на выход, подавляя при этом все остальные. На рис. 4 приведены идеализированные спектрограммы выходных суммарных сигналов простейших таких фильтров, содержащих 2, 3, 4, 5, ..., 8 считывающих головок.

Ситуация принципиально не меняется, если простейшие фильтры объединены в ансамбли. Из-за характерной формы амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) таких фильтров они получили название решётчатых или гребенчатых фильтров. Номер младшей гармоники, проходящей на выход такого фильтра, определяет порядок фильтра  $k$ . Поэтому наборы СГ с подобными АЧХ будем называть гребенчатыми фильтрами пропускающего типа  $k$ -го порядка.

*Гребенчатые фильтры режекторного типа в ДУП.* Если гребенчатые фильтры пропускающего типа из всего входного потока гармоник выделяют свойственные им гармоники и пропускают их на выход, то режекторные фильтры из всего входного потока гармоник выделяют свойственные им гармоники и, наоборот, подавляют их, пропуская все остальные на выход. По характеру воздействия на входной поток гармоник оба этих фильтра можно назвать комплементарными, т. е. имеющими взаимно противоположное воздействие, дополняющими друг друга. Идеализированные АЧХ решётчатых фильтров пропускающего и режекторного типов приведены на рис. 5. На рис. 5, *a* представлен входной

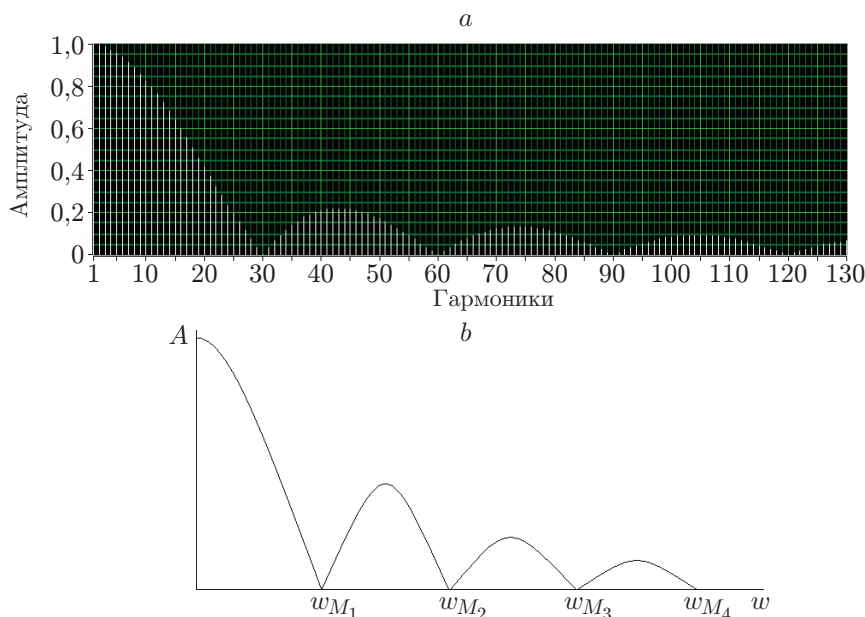


Рис. 6. Форма АЧХ режекторного фильтра в ДУП: *a* — результат моделирования АЧХ растрового сопряжения двух амплитудных растров; *b* — график функции  $|\sin w|/w$  ( $A$  — амплитуда гармоники,  $w_{M_i}$  — номер гармоники)

поток гармоник, на рис. 5, *b* — АЧХ гребенчатого фильтра пропускающего типа восьмого порядка, на рис. 5, *c* — АЧХ гребенчатого фильтра режекторного типа. По аналогии с фильтрами пропускающего типа режекторные фильтры можно характеризовать своими порядками  $k$ . Так как фильтр, АЧХ которого представлена на рис. 5, *c*, пропускает семь младших гармоник, а восьмую — подавляет, то для него  $k = 8$ . Если порядки фильтров пропускающего и режекторного типов одинаковые (см. рис. 5, *b*, *c*), то эти фильтры будем считать когерентными (согласованными). В различных областях науки выделены характерные для этих областей комплементарные признаки, которые при определённых условиях могут полностью нейтрализовать друг друга.

Рассмотрим, каким образом данное свойство комплементарных решётчатых фильтров может решить проблему полного подавления искажающего действия инструментальной погрешности ДУП.

В современных ДУП режекторным фильтрам можно поставить в соответствие растровое сопряжение, образованное ИР датчика совместно с соответствующими масками индикаторных растров СГ. В [12] показано, что характеристики растрового сопряжения удобно анализировать с позиций фильтра простого скользящего среднего (ФПСС). Известно, что амплитудно-частотная характеристика ФПСС подобна графику функции  $|\sin \theta|/\theta$ . Выполненное в [13] моделирование процессов подавления гармоник искажающей функции  $F_{err}$ , осуществляемого растровыми сопряжениями, показало, что реальная форма АЧХ режекторного фильтра в ДУП (рис. 6, *a*) заметно отличается от идеализированных АЧХ, представленных на рис. 5, *c*, и практически подобна графику функции  $|\sin \theta|/\theta$  (рис. 6, *b*). В работе [13] было также отмечено, что применительно к ФПСС порядком фильтра традиционно принято считать количество элементов, участвующих одновременно в формировании выходного сигнала. Определение порядка ФПСС в [13] отличается от предложенного в данной работе. Так как такое определение порядка режекторных фильтров в ДУП не устоялось, далее будет применяться принятое в более ранних работах.

Для дальнейшего рассмотрения процессов преобразования углов важными характе-

ристикой кривой на рис. 6,  $b$  являются координаты  $\omega_{M_i}$ , в которых выходная функция обращается в нуль. Применительно к ДУП координаты этих точек определяют номера гармоник, амплитуды которых в выходном сигнале СГ обращаются в нуль. В дальнейшем эти узловые точки будем называть характеристическими. Анализ фильтрующих свойств растровых сопряжений показал [12, 13], что значения номеров характеристических частот  $\omega_{M_i}$  зависят как от числа штрихов в ИР, так и от числа штрихов маски индикаторного растра, участвующих в формировании выходного сигнала

$$\omega_{M_i} = N/m,$$

где  $N$  — число штрихов ИР ДУП, а  $m$  — число штрихов маски индикаторного растра, участвующих в формировании выходного сигнала СГ. Применительно к растровому сопряжению порядок  $p$  ФПСС тождественно равен числу штрихов  $m$  маски индикаторного растра, участвующих в формировании выходного электрического сигнала, т. е.  $p \equiv m$ . Откуда следует, что

$$\omega_{M_i} = N/p.$$

**Согласование характеристик гребенчатых фильтров в ДУП.** До настоящего времени такие важные характеристики ДУП, как число штрихов ИР, размеры фотоприёмников в СГ, конфигурация индикаторной маски и само число СГ, реально не согласовывались между собой, поскольку между ними не усматривались фундаментальные связи. Их выбор подчинялся другим, зачастую второстепенным, требованиям. При таком подходе характеристики формируемых решётчатых фильтров, ответственных за точность измерений, чаще всего оказываются несогласованными (некогерентными). Этот вывод проиллюстрируем на примере четырёхголовочного ДУП круговой измерительно-диагностической установки (КИДУ) модели АЭ.1686 [14]. На рис. 7 представлена АЧХ датчика, созданного на базе измерительного растра с 36 000 штрихов, имеющего период следования штрихов, равный 14 мкм. Фотоприёмники в СГ имеют размеры  $2,7 \times 1,2$  мм. Такой ДУП производит фильтрацию ряда пространственных гармоник искажающей функции  $F_{err}$  растра и пропускает на выход гармоники  $w_F$  с номерами, кратными 4. Эти гармоники на рис. 7 представлены вертикальными отрезками, амплитуда которых определяется параметрами ФПСС. Совокупность амплитуд формирует огибающую  $I$  данного фильтра. Численные значения характеристических частот  $\omega_M$  фильтра определяются параметрами ФПСС. При ориентации фотоприёмников фотодиодной матрицы длинной стороной

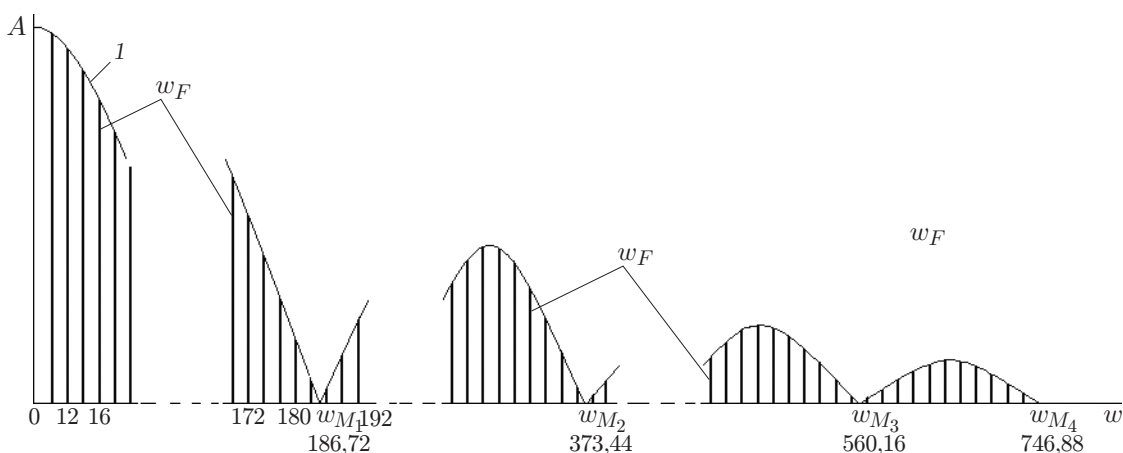


Рис. 7. АЧХ 4-головочного преобразователя



вдоль образующей раstra число штрихов  $m$ , участвующих в формировании выходного сигнала, равно отношению  $L$  — размера этой стороны фотодиода — к  $d$ -периоду раstra:  $m = L/d = 2700/14 = 192,8$ . С данным типом фотоприёмников номера характеристических частот  $\omega_M$  ФПСС растрового сопряжения будут кратны:  $36\,000/192,8 = 186,72$ . Нетрудно заметить, что сформированный фильтр обладает некоторыми сглаживающими свойствами в области высоких частот, а за счёт малого ослабления на самых низких частотах хорошо воспроизводит фазовые соотношения. При таких произвольно выбранных значениях характеристик основных узлов ДУП (число штрихов в ИР, число СГ, размеры фотоприёмников в СГ, конфигурация матрицы индикаторных растров) фильтрующие свойства растрового сопряжения практически не влияют на качество угловых измерений.

Но именно эти избирательные свойства ФПСС далее будут использованы для решения проблемы полного подавления искажающего вклада гармоник  $w_F$  искажающей функции  $F_{err}$ . Это становится возможным, если жёстко согласовать параметры решётчатых фильтров обоих типов. Для этого достаточно сделать  $\omega_M$  и  $w_F$  в точности равными друг другу т. е.  $\omega_{M_1} = w_{F_1}$ ,  $\omega_{M_2} = w_{F_2}$  и т. д.

Вначале оценим параметры фильтра пропускающего типа, который создаст необходимые условия для решения поставленной задачи. Для этого выберем параметры независимых наборов СГ так, чтобы частота младшей пропускаемой гармоники на выходе ансамбля СГ лежала вблизи начальной подавляемой частоты исходного режекторного фильтра, т. е. вблизи частоты  $\omega_M = 186,72$ . Для раstra с  $N = 36\,000$  наиболее близкими среди возможных значений  $w_F$  явились бы значения 180 и 200 (значения выбираемых гармоник  $w_F$  определяются как произведение простых делителей из полного набора подобных делителей числа 36 000). Чтобы реализовать требуемые значения  $w_F$  на практике целесообразно использовать мультикомбинационный принцип построения ансамблей СГ. При таком подходе частота  $w_{F_1} = 180$  обеспечивается, например, ансамблем СГ формата 459 ( $4 \times 5 \times 9 = 180$ ). Для этого ансамбля число СГ равно 16 ( $4 + 5 + 9 - 2 = 16$ ). Вторая частота  $w_{F_1} = 200$  может обеспечиваться ансамблем, образованным двумя наборами, которые содержат 8 и 25 СГ ( $8 \times 25 = 200$ ). Полное число СГ в таком ансамбле достигает 32 ( $8 + 25 - 1 = 32$ ). Это слишком дорогой вариант решения поставленной задачи, и его нецелесообразно рекомендовать для реализации на практике. Поэтому остановим выбор на формате 459. Ансамбль формата 459 обеспечивает подавление первых 179 гармоник и реализует пропускание на выход 180-й и кратных ей гармоник исходной искажающей функции  $F_{err}$ . Затем на втором шаге итерации произведём точное согласование параметров режекторного фильтра. В анализируемом случае характеристические частоты фильтра ФПСС  $\omega_M$  должны быть кратны 180. Для ИР с числом штрихов  $N = 36\,000$  порядок фильтра ФПСС  $p = N/\omega_{M_1} = 36\,000/180 = 200$ . Для растрового сопряжения с периодом следования штрихов, равным 14 мкм, это значение порядка фильтра обеспечивается при размере окна индикаторной маски (или длиной стороны фотоприёмника) 2,8 мм. Амплитудно-частотная характеристика фильтра простого скользящего среднего для данного размера окна приведена на рис. 8, а, где представлено взаимодействие этого фильтра с гармониками от набора из 9 считывающих головок (одним из трёх независимых наборов, образующих формат 459). Здесь серыми линиями показаны гармоники, кратные 9, на входе фильтра, а тёмными — на выходе фильтра. Причём представлены они на начальном участке спектра функции  $F_{err}$  (с 0-й до 800-й гармоники включительно из всех возможных 36 000 значений). Полный ансамбль формата 459 имеет передаточную характеристику вида, представленного на рис. 8, б. Здесь также серыми линиями показан спектр функции  $F_{err}$  на входе ансамбля, а тёмными — на его выходе. Результат совместного действия двух комплементарных согласованных (когерентных) фильтров (пропускающего формата 459 и фильтра скользящего среднего с параметром  $p = 200$  и  $\omega_M$ , кратными 180) приведён на рис. 8, в сплошной тёмной линией нулевой амплитуды. Здесь штриховыми линиями дано наложение переда-

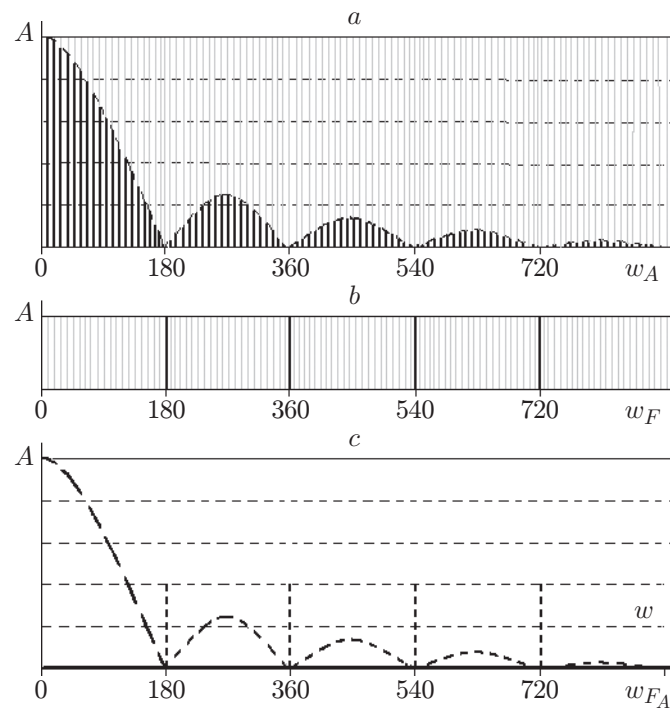


Рис. 8. Действие когерентных решётчатых фильтров: *a* — АЧХ фильтра простого скользящего среднего для окна размером 2,8 мм; *b* — передаточная характеристика полного ансамбля формата 459; *c* — результат совместного действия двух комплементарных когерентных решётчатых фильтров

точных характеристик обоих фильтров. Представленная результирующая спектрограмма демонстрирует эффект полного подавления всех гармоник исходной искажающей функции  $F_{err}$ . Указанный результат достигнут за счёт точного согласования параметров узлов, входящих в состав исходного ансамбля независимых наборов СГ. Рассмотренное техническое решение по согласованию параметров комплементарных решётчатых фильтров не является единственным. Например, для данного ИР можно использовать ансамбль формата 345, для которого характеристические частоты кратны  $w_F = 60$ . Здесь специфика технического решения основана на предварительном переформатировании матрицы индикаторных масок, которое позволит применить алгоритм измерений, аналогичный вышеописанному.

**Заключение.** Аналитическими расчётами показано, что применение ансамбля считывающих головок формата 459 при использовании в них матриц индикаторных масок с окнами размерами  $2,8 \times 2,0$  мм, измерительного раstra с числом штрихов 36 000 и периодом следования штрихов 14 мкм позволяет полностью подавить искажающее действие инструментальной погрешности раstra. Таким образом, за счёт точного согласования параметров базовых узлов, входящих в состав ансамбля независимых наборов СГ, можно обеспечить полное подавление всех гармоник исходной искажающей функции  $F_{err}$  и тем самым повысить точность угловых измерений.

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственная регистрация № 121042900050-6).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ионак В. Ф. Приборы кинематического контроля. М.: Машиностроение, 1981. 129 с.

2. **Watanabe T.** Is an angular standard necessary for rotary encoder // Synthesiology. 2008. **1**, N 4. P. 296–304.
3. **Masuda T., Kajitani M.** An automatic calibration system for angular encoders // Precision Eng. 1989. **11**, N 2. P. 95–100.
4. **Watanabe T., Fujimoto H., Nakayama K. et al.** Automatic high-precision calibration system for angle encoder // Proc. SPIE. 2001. **4401**. P. 267–274.
5. **Watanabe T., Kon M., Nabeshima N., Taniguchi K.** An angle encoder for super-high resolution and super-high accuracy using SelfA // Meas. Sci. Technol. 2014. **25**, N 6. 065002.
6. **Krause M., Just A., Geckeler R. D., Bosse H.** Angle metrology at the PTB: Current status and developments // Proc. of the 9-th Int. Symp. on Measurement Technology and Intelligent Instruments. St. Petersburg, Russia, 2009. P. 2-092-2-096.
7. **Geckeler R., Link A., Krause M., Elster C.** Capabilities and limitations of the self-calibration of angle encoders // Meas. Sci. Technol. 2014. **25**, N 5. 055003.
8. **Europ. Pat. 0440833 B1.** Angle measuring device /J. Heidehain. Date of patent: 06.08.1994. 8 p.
9. **Watanabe T., Fujimoto H., Masuda T.** Self-calibratable rotary encoder // Journ. Phys. Conf. Series. 2005. **13**, N 1. P. 240–245.
10. **Watanabe T., Fujimoto H.** High accuracy angle indexing table // Proc. of the XVIII IMEKO World Congress Metrology for a Sustainable Development. Rio de Janeiro, Brazil, 17–22 Sept., 2006. 3 p.
11. **Watanabe T., Fujimoto H.** Application of a self-calibratable rotary encoder // Proc. of 9th Int. Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments (ISMTII). Saint-Petersburg, Russia, 29 June – 2 July, 2009. Vol. 3. P. 54–58.
12. **Кирьянов В. П., Зюбин В. Е., Кирьянов А. В. и др.** Моделирование инструментальной погрешности фотоэлектрических преобразователей комбинированного типа, обусловленной неточностью изготовления растра // Вестн. НГУ. Сер. Информационные технологии. 2015. **13**, вып. 2. С. 34–41.
13. **Максимов А. С.** Исследование интегрирующих свойств растрового сопряжения // Матер. Междунар. науч. студенч. конференции «МНСК-2014: Инструментальные методы и техника экспериментальной физики». Новосибирск: НГУ, 2014. С. 48.
14. **Кирьянов А. В., Зотов А. А., Каракоцкий А. Г. и др.** Особенности оперативного контроля прецизионных углоизмерительных структур // Измерительная техника. 2019. № 5. С. 31–36.

*Поступила в редакцию 11.02.2021*

*После доработки 27.04.2021*

*Принята к публикации 10.05.2021*

---