

УДК 53.088.6 + 681.5.017

АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ САМОКАЛИБРОВКИ В ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКАХ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

© В. П. Кирьянов¹, А. Д. Петухов¹, А. В. Кирьянов^{1,2}

¹Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1

²Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20
E-mail: alexey@iae.nsk.su

К настоящему времени в прецизионной гониометрии разработано два основных вида алгоритмов самокалибровки оптических датчиков угловых перемещений, отличающихся регулярной и нерегулярной локализацией считывающих головок, используемых в их составе. Анализ точностных показателей таких датчиков выявил наличие в них не предусмотренных теорией особенностей, которые стимулировали выполнение экспериментов по моделированию ожидаемых показателей подобных алгоритмов. Предложенная имитационная модель оптических датчиков угловых перемещений на основе двумерного массива данных позволяет с достаточной для практики точностью выявлять методическую погрешность алгоритма измерений за счёт определения остаточного вклада искажающей функции в итоговую погрешность измерений. Кроме того, она даёт возможность выявить характерные особенности калибровочных кривых, формируемых на основе методов с равномерной или неравномерной локализацией считывающих головок. Результаты моделирования показывают, что методы самокалибровки, основанные на регулярной локализации считывающих головок, позволяют получить более высокую точность измерений по сравнению с методами, основанными на применении нерегулярной локализации.

Ключевые слова: гониометрия, датчики угловых перемещений, алгоритмы самокалибровки, погрешность преобразования, имитационное моделирование.

DOI: 10.15372/AUT20220302

Введение. В современной прецизионной гониометрии (погрешность преобразования $\leq 0,5$ угл. с) процесс повышения точности оптических датчиков угловых перемещений (ОДУП) основан на применении структурно-алгоритмических методов, предполагающих использование нескольких считывающих головок (СГ), размещённых определённым образом вдоль образующей измерительного растра (ИР) [1], совместную обработку их выходных сигналов, в результате которой осуществляются автоматическая коррекция систематической погрешности растра и автоматическая статистическая обработка случайных погрешностей преобразователя.

Разработанные в различных странах методы автокалибровки и самокалибровки основаны на делении полного круга и использовании того факта, что сумма углов разделённой окружности на плоскости равна 2π рад. В соответствии с данной концепцией полная окружность представляет собой фундаментальный угловой стандарт без каких-либо методических или иных ошибок [2]. До последнего времени самым распространённым методом автокалибровки угловых датчиков был метод кросскалибровки [3]. Проведение этой операции осуществляется на специальном угловом компараторе, с помощью которого калибруемый датчик сличается с прецизионным угловым стандартом при разных взаимных положениях. В качестве углового стандарта применялись, как правило, многогранные призмы, а сейчас используются прецизионные ОДУП. Одним из основных недостатков этого метода является большое время измерений (несколько часов).

В противоположность этому методы самокалибровки являются самореферентными, поскольку основываются на считывании информации с радиального ИР одновременно несколькими СГ для снижения погрешности ОДУП или определения инструментальной погрешности ИР. Поэтому такие методы идеально подходят для быстрой и точной калибровки *in situ* ОДУП без использования каких-либо внешних стандартов или вспомогательных устройств, установленных на объект измерений. В большинстве случаев эти методы имеют свои собственные названия. Например, первым появился метод путевого усреднения (МПУ) [4, 5], затем появился метод Масуды [6], далее был предложен метод усреднения при равном делении (EDA — equal division averaged) [7], потом мультикомбинационный метод Ватанабэ [8], VEDA-метод [9] и др. При этом следует отметить, что по мере развития принципов самокалибровки и усложнения структуры самих ОДУП менялись и цели реализации этих алгоритмов. Если на начальном этапе основной целью было повышение точности угловых измерений за счёт подавления максимального числа гармоник в спектре искажающей функции F_{err} , то на более поздних этапах всё чаще главной целью является получение калибровочных кривых для отдельных СГ, используемых в ОДУП. Полученные индивидуальные калибровочные кривые использовались в процессорах датчиков для коррекции результатов измерений.

Для того чтобы определиться с выбором того или иного алгоритма преобразования данных, необходимо чётко понимать особенности каждого из разработанных методов измерений. В этом отношении работа [10] стала ключевой. В ней отмечалось, что результаты калибровки углового компаратора модели WMT-220, созданного фирмой Heidenhain (Германия) и используемого в настоящее время в Германии в качестве национального стандарта единицы плоского угла, существенно зависят от применённого метода калибровки (самокалибровки или кросскалибровки).

В данной работе представлены результаты анализа технических особенностей реализации того или иного метода самокалибровки, полученные компьютерным моделированием алгоритмов преобразования информации, поступающей от СГ. При этом предпринята попытка оценить методическую погрешность известных алгоритмов. В отличие от уже выполненных в мире исследований, основной целью которых являлось определение реальной погрешности ОДУП, рассматриваемых как «чёрный ящик», в данном исследовании погрешность объекта контроля считается известной, а оцениваются результаты восстановления значения погрешности объекта, полученные в соответствии с предписаниями известных методов путём сравнения выходных сигналов одной СГ с выходными сигналами сборки СГ. По мнению авторов, такой подход дал достаточно интересные результаты, которые представлены в предлагаемой работе.

1. «Подводные камни» методов самокалибровки с нерегулярной локализацией СГ. Как уже упоминалось выше, наиболее востребованным способом повышения точности ОДУП является сложение выходных сигналов от нескольких СГ, расположенных по образующей ИР ОДУП с равномерным или неравномерным шагом (процедурой, называемой далее равномерной или неравномерной локализацией СГ). При регулярной локализации СГ (рис. 1, *a*) удаётся существенно снизить искажающий вклад инструментальной погрешности в итоговый результат, так как в выходном сигнале остаётся искажающий вклад только от N -й и кратных ей гармоник (N — число СГ в ОДУП).

Так, для случая, представленного на рис. 1, *a*, в выходном сигнале созданного ансамбля СГ остаётся искажающий вклад только от 8-й и кратных ей: 16, 32, 40, 48-й и т. д. гармоник исходного спектра.

В работе [6] выдвинут тезис о том, что равномерное распределение СГ вдоль образующей ИР приводит к чрезмерному удорожанию и усложнению измерительного оборудования, и предложен вариант ОДУП с нерегулярным расположением СГ. Расстановка СГ в соответствии с высказанной идеей представлена на рис. 1, *b*. Здесь каждая новая

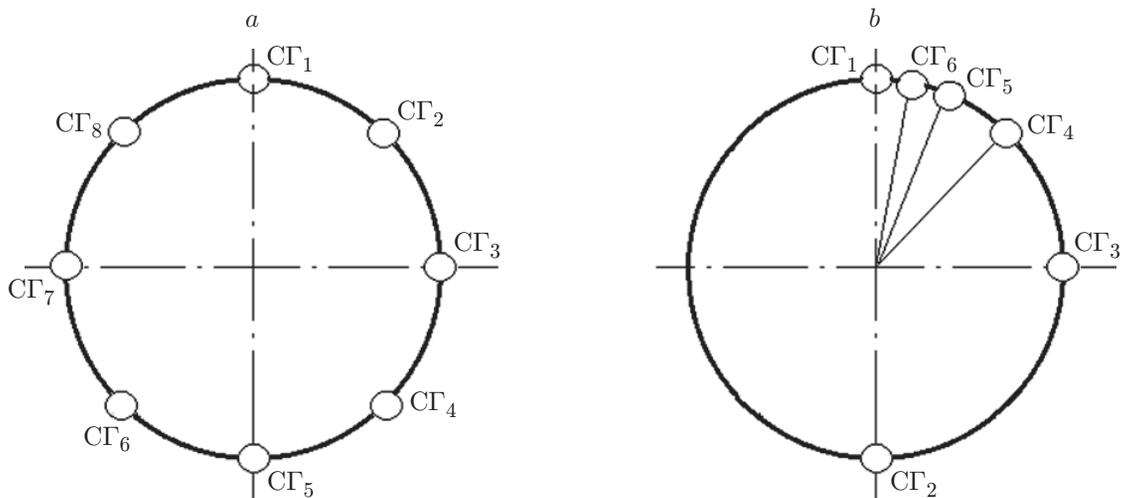


Рис. 1. Принцип равномерной и неравномерной локализации СГ в ОДУП: *a* — регулярное размещение СГ вдоль образующей ИР (чёрная окружность); *b* — вариант нерегулярного размещения СГ внутри одного квадранта образующей ИР (чёрная окружность)

СГ делит угловой сектор, в котором она устанавливается, пополам. Подобное размещение СГ обеспечивает в результате сравнения суммарного выходного сигнала с выходным сигналом одной головки подавление гармоник, кратных 2^n , где n — число делений угловых секторов раstra пополам. Например, при $n = 5$ подавляются первые 31 гармоника, но сохраняется искажающее действие всех последующих гармоник.

Привлекательность самокалибровки с нерегулярной локализацией СГ настолько очевидна, что она, естественно, активно применяется во всём мире. В [11] анализируется угловой компаратор, созданный с целью реализации на его основе национального стандарта плоского угла. В составе референтного ОДУП данного компаратора используется ансамбль из 12 СГ, локализованных вдоль образующей ИР в соответствии с предписаниями мультикомбинационного метода Ватанабэ для ансамбля СГ формата 67. Как следствие, в этом ОДУП используется два независимых набора СГ, имеющих в своём составе 6 и 7 СГ соответственно, которые должны детектировать в спектре искажающей функции F_{err} гармоники с номерами от 1 до 41-го и кратные им. Согласно постулатам данного метода амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) датчика должна формироваться гармониками, представляющими собой остаточный вклад искажающей функции F_{err} . В соответствии с форматом ансамбля он должен быть представлен 42-й и кратными ей гармониками, которые концептуально не должны детектироваться данным ансамблем СГ.

Однако ситуация оказалась намного сложнее. Во-первых, из приведённых в работе технических показателей видно, что в [11] была достигнута неопределённость задания угла поворота в пределах $\pm 0,05''$. Это на первый взгляд достаточно высокий результат, но разработчики использовали для этого 12 СГ. Если сравнить этот итог с характеристиками компаратора WMT-220, то можно убедиться, что данный результат заметно уступает достижениям [10]. Такой вывод можно сделать на основе того, что при использовании МПУ с восьмью СГ была достигнута неопределённость, не превышающая $\pm 0,01''$, что в 5 раз лучше показателей, достигнутых в [11], хотя они использовали для этого всего 8 СГ. Применение дополнительных 8 СГ, установленных по запатентованной схеме, позволило специалистам [12] достичь ещё большей точности: $\pm 0,001''$. Это уже в пятьдесят раз выше, чем в [11].

Во-вторых, из анализа АЧХ ОДУП, приведённого в [11], видно, что остаточный спектр не соответствует предписаниям мультикомбинационного метода Ватанабэ. Для формата 67 он должен быть представлен гармониками, кратными 42, в то время как он представлен гармониками, кратными 6. Это следует из номеров гармоник 360, 1080, 2160, 3240 и т. д., характеризующих оцифрованные гармоники, выделяющиеся на графике своей амплитудой. А это означает, что остаточный вклад обеспечивается выходными сигналами СГ, входящих в состав набора только из 6 СГ. Набор из 7 СГ как бы и не участвует в преобразовании информации нужным образом. Такой вывод можно сделать, приняв условие, что все 12 СГ одинаковы, технически исправны и продолжают функционировать.

Таким образом, процесс фильтрации в ансамблях с нерегулярным расположением СГ может заметно отличаться от исходных постулатов и нуждается в дополнительном анализе. Такой анализ можно реализовать путём компьютерного моделирования процедуры преобразования данных в подобных ансамблях.

2. Процедура тестирования алгоритмов самокалибровки в ОДУП. В качестве первого этапа тестирования алгоритмов самокалибровки была выполнена процедура моделирования остаточного вклада искажающей функции F_{err} в выходном сигнале ОДУП. Оценка величины этой функции может быть произведена с помощью двумерного массива данных. Каждая строчка массива представляет собой функцию F_{err} , характерную для ИР исследуемого ОДУП, сдвинутую по фазе на $k2\pi/m$. Здесь $k = 1, \dots, m - 1$ — текущий номер, а m — общее число СГ в исследуемом ансамбле. Число мгновенных значений функции F_{err} в каждой строке двумерного массива равно числу штрихов в ИР исследуемого датчика, а число строк массива равно m . Имитация процесса формирования искажающего вклада функции F_{err} в текущем значении выходного сигнала ОДУП может быть осуществлена путём построчного сложения в каждом столбце двумерного массива элементов функции F_{err} и усреднения получающихся сумм на m . Во всех анализируемых модельных экспериментах в качестве функции F_{err} был использован массив данных, полученный с помощью специализированной измерительной машины [13], в результате контроля погрешности ИР, изготовленного фирмой Heidenhain для ОДУП модели ROD-800. Указанный файл несёт информацию о погрешности формирования одного из краёв каждого штриха ИР (рис. 2). Из приведённого графика следует, что погрешность нанесения штрихов ИР лежит в пределах $\pm 1,3''$ (δ_{p-p}). Наблюдается разрыв непрерывности функции F_{err} (дефект, характерный для технологии Diadur), и имеется значительная шумовая составляющая в результатах контроля.

Чтобы результаты моделирования максимально соответствовали реальным процессам преобразования информации в ОДУП, в модельных экспериментах необходимо выполнить компьютерную имитацию растровых сопряжений СГ. Для этого процедура формирования сигналов представляется как процедура фильтрации данных с помощью фильтра простого скользящего среднего (ФПСС) [14]. Искажающий вклад функции F_{err} , полученный в

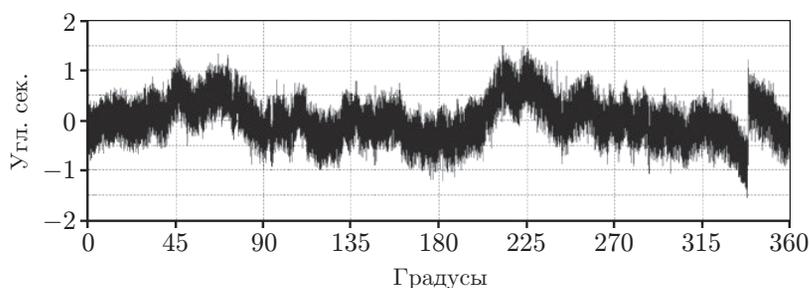


Рис. 2. Исходная кривая накопленной погрешности ИР ОДУП модели ROD-800

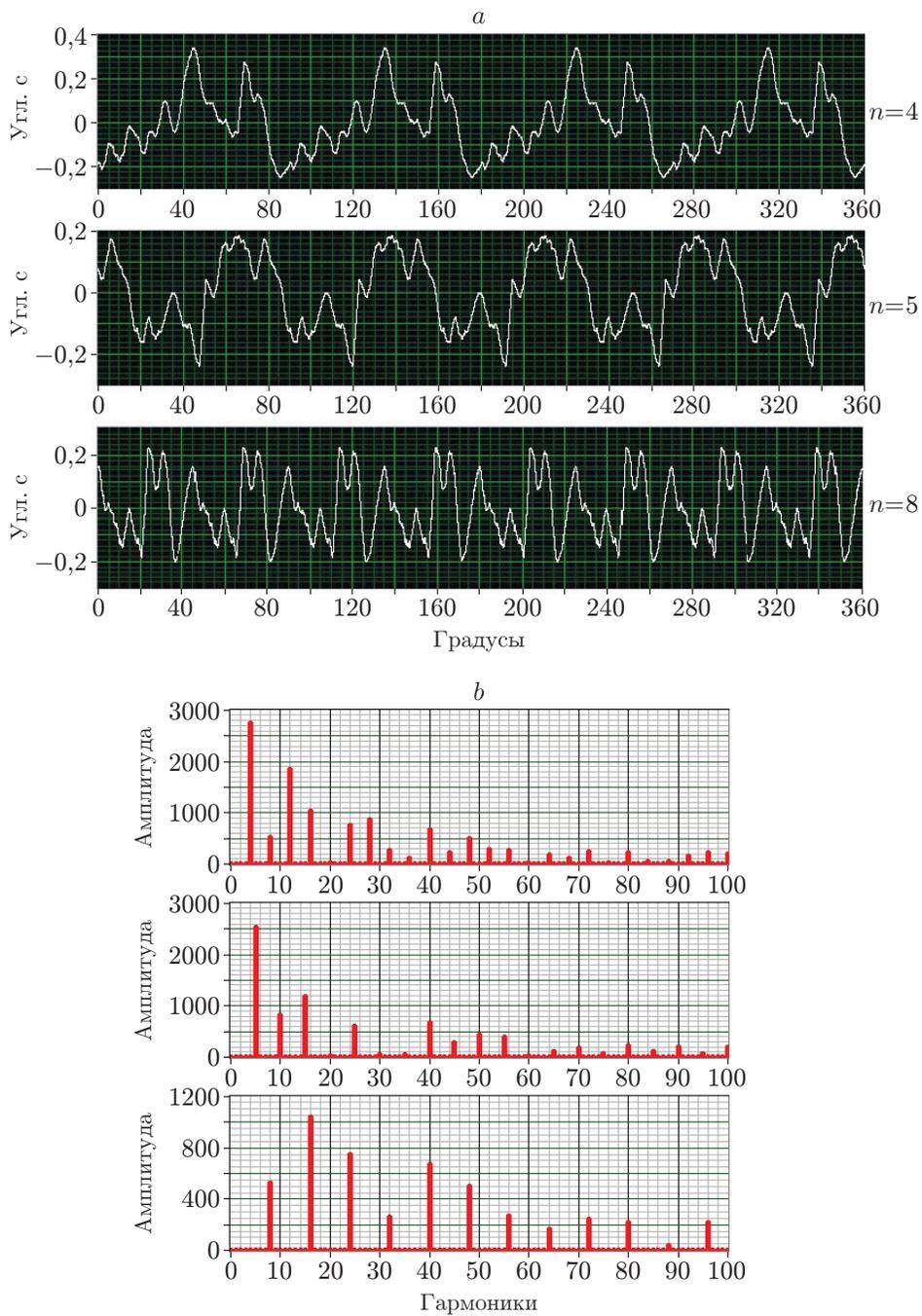


Рис. 3. Остаточный вклад искажающей функции F_{err} при различном числе СГ:
a — формы кривых калибровки, *b* — спектральный состав кривых

результате имитации процедуры формирования сигналов с помощью СГ, которые имеют в своём составе индикаторные растры с числом штрихов $M = 300$, представлен в [14].

3. Результаты моделирования остаточного вклада искажающей функции F_{err} в выходном сигнале ОДУП с регулярной локализацией СГ. Так как МПУ можно представить как частный случай EDA-метода, то анализ работы таких многоголовочных ОДУП с регулярной локализацией СГ выполнен по одной схеме. Промоделированы варианты использования n СГ, установленных с шагом $2\pi/n$, где $n = (2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 15$ и $16)$. В основе алгоритма обработки данных лежит известный постулат, согласно которому сумма погрешностей $\Delta\varphi_j$ от N штрихов круговой ИР равна нулю [15]. Данное утверждение справедливо с высокой точностью для $N \gg 0$. Для сумм с малым значением выбранных слагаемых N справедливость данного постулата приходится проверять экспериментально и выявлять характерные закономерности. Ряд этих закономерностей был уже сформулирован в виде постулатов МПУ или EDA-метода. Отклонение от равенства нулю суммы погрешностей $\Delta\varphi_j$ от N штрихов круговой ИР далее будет рассматриваться как остаточный вклад функции F_{err} в выходном сигнале ОДУП.

Результаты обработки данных в соответствии с указанным алгоритмом приведены на рис. 3. Из всего массива реализованных экспериментов на рис. 3 представлены результаты моделирования только для $n = (4, 5, 8)$, которые тем не менее позволяют наглядно проиллюстрировать выводы по результатам моделирования, выполненным для всех n . Анализ спектров остаточного вклада функции F_{err} для всех вариантов размещения СГ показал, что они представлены исключительно характеристическими гармониками, номера которых кратны числу СГ, используемых в данном эксперименте. Таким образом, результаты модельных экспериментов полностью коррелируют с постулатами обоих методов.

4. Результаты моделирования процедуры снятия калибровочных кривых *in situ* с использованием основных методов самокалибровки. Как уже отмечалось, для снятия калибровочной кривой, которая характеризует погрешность отдельной СГ, применяется регистрация отклонений в моментах прохода через нулевую линию выходного сигнала данной головки относительно аналогичных моментов выходного сигнала, формируемого ансамблем СГ. При этом в модельных экспериментах используется файл данных, который несёт информацию об отклонениях краёв штрихов ИР ОДУП относительно их идеальных положений. В анализируемых ситуациях сравнение отклонений в моментах пересечения нулевой линии тождественно сравнению отклонений краёв штрихов от их идеальных положений. Это позволяет применять указанный массив данных для моделирования процедуры снятия калибровочной кривой (кривой погрешности) для любой из СГ.

4.1. Результаты моделирования на основе EDA-метода. Алгоритмы получения калибровочных кривых были промоделированы для тех же двенадцати значений n , которые проанализированы в разд. 3. Сравнивая калибровочные кривые и их спектры, полученные для различных n , с исходной кривой погрешности, можно попытаться выявить неизвестные аспекты того или иного алгоритма самокалибровки. Это представляется важным, так как для потребителя ОДУП выглядит как своеобразный «чёрный ящик», параметры которого должны быть выявлены с помощью процедуры самокалибровки. Однако при моделировании проявилось то, что форма детектированных калибровочных кривых заметно отличается от исходной кривой искажающей функции F_{err} из-за отсутствия характеристических гармоник. И это происходит несмотря на то, что амплитуды детектируемых гармоник точно соответствуют амплитудам гармоник в исходной кривой. Следовательно, синтезированные формы детектированных кривых трудно использовать для оценки точности процедуры калибровки ансамбля СГ. Здесь более информативным параметром выступают амплитуды гармоник спектра кривой погрешности, которые далее и будут использованы для оценки точности процедуры калибровки. На рис. 4 представлены резуль-

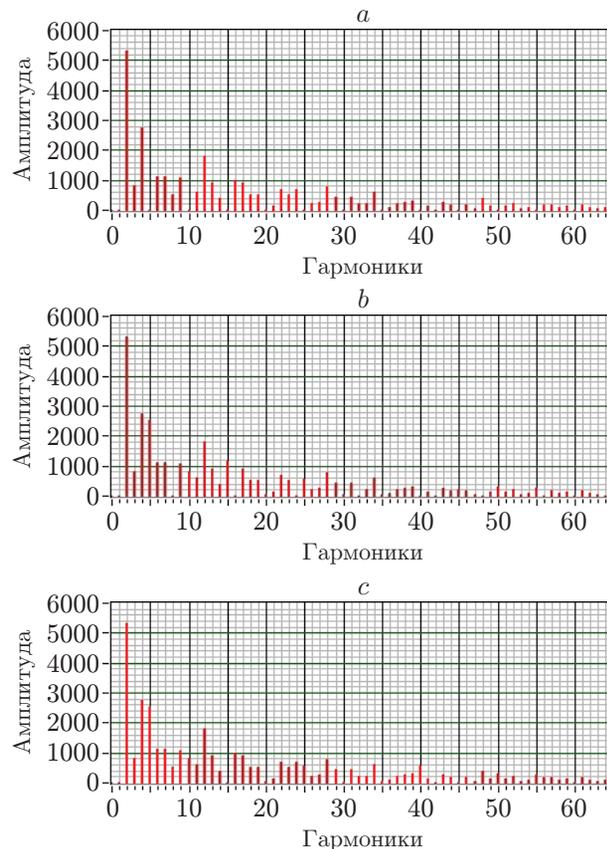


Рис. 4. Спектры калибровочных кривых, детектированных на основе EDA-метода с числом головок: $n = 5$ (a), $n = 8$ (b), $n = 15$ (c)

таты моделирования спектра гармоник кривых калибровки для трёх случаев с $n = (5, 8$ и $15)$, которые тем не менее позволяют обобщить результаты моделирования и на МПУ. Например, чётко наблюдается, что в спектрах калибровочных кривых принципиально отсутствуют характеристические гармоники, кратные n . Это позволяет утверждать, что результаты данного модельного эксперимента точно совпадали с выводами разработчиков EDA-метода. В связи с этим интересно сравнить соответствие результатов моделирования процедур детектирования калибровочных кривых базовым постулатам методов с нерегулярным размещением СГ, в том числе с расположением головок в специальных позициях. В [9, 16] утверждается, что результаты детектирования с помощью всего двух СГ, установленных в специальных точках, могут быть тождественны результатам детектирования с помощью целого ансамбля СГ, локализованных с равным шагом. На основе этого утверждения, например, в [16] строится стратегия оптимизации числа СГ в ОДУП.

4.2. *Результаты моделирования по методу Масуды.* Оценка итогов детектирования калибровочных кривых по методу Масуды выполнена путём анализа их спектрального состава как в целом (рис. 5, b), так и для промежуточных стадий формирования этой кривой (рис. 6, a—d). Сравнивая рис. 5, b с исходным спектром (рис. 5, a), можно отметить, что для всего датчика подтверждается базовый постулат метода: не детектируются 32-я и кратные ей гармоники. Однако амплитудный спектр гармоник калибровочной кривой внутри интервала 32 гармоник заметно отличается от исходного спектра искажающей функции F_{err} (см. рис. 5, a). Для понимания природы этих различий анализировались амплитудные спектры гармоник на промежуточных этапах (см. рис. 6). На промежуточ-

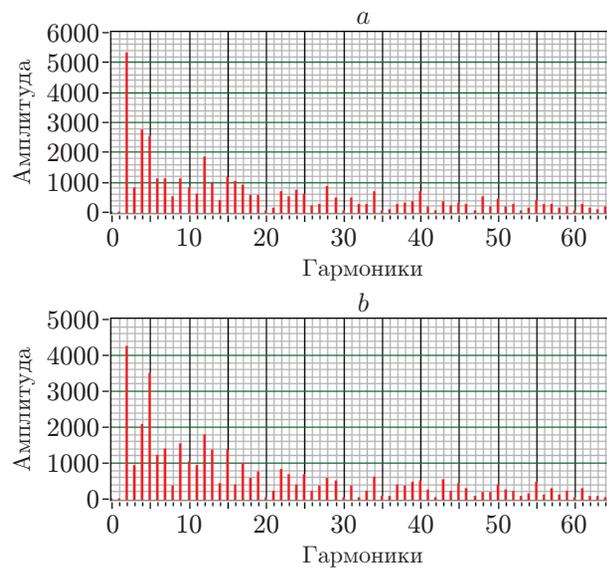


Рис. 5. Спектры гармоник: a — исходной искажающей функции, b — калибровочной кривой на основе метода Масуды

ных этапах не детектируются 4, 8, 16 и 32-я гармоники. Эти результаты сравнивались с результатами детектирования калибровочных кривых с помощью соответствующих ансамблей СГ, локализованных по образующей ИР с регулярным шагом. Так, результат, представленный на рис. 6, b ($0-45^\circ$), сравнивался с результатом для ансамбля из 8 СГ (см. рис. 4, $n = 8$). В обоих случаях не должны детектироваться 8-я и кратные ей гармоники. Этот эффект действительно наблюдается в обоих случаях. Но в случае ансамбля из 8 СГ амплитуды всех гармоник точно совпадают с амплитудами соответствующих гармоник исходной искажающей функции. В то время как результат детектирования с помощью 2 СГ, расположенных в позициях с координатами 0 и 45° , имеет значительное искажение амплитуд гармоник. Это же наблюдается и при расположении СГ на позициях $0-22,5^\circ$ и $0-11,25^\circ$. Для обоих случаев наблюдается ожидаемое отсутствие гармоник (16-й и 32-й), но внутри спектральных интервалов (0–16 гармоник), (0–32 гармоник) амплитуды гармоник заметно отличаются от амплитуд соответствующих гармоник исходной функции F_{err} . Проиллюстрируем данный тезис для спектрального интервала (0–32 гармоник), в котором имеется неточность передачи, например, 4-й и 5-й гармоник: в детектированной кривой амплитуда 5-й гармоники существенно превышает амплитуду 4-й, в то время как в исходном спектре амплитуда 5-й гармоники даже несколько меньше амплитуды 4-й гармоники. Разработчики о подобных тонкостях своего метода не упоминают. Более точную информацию о погрешности детектирования калибровочной кривой можно извлечь из анализа остаточного вклада искажающей функции F_{err} , представленного на рис. 7. Из рисунка следует, что все младшие гармоники калибровочной кривой с номерами от 2-й до 31-й включительно при использовании данного алгоритма выделяются с некоторыми погрешностями (равенство нулю 20-й гармоники в данном эксперименте объясняется её отсутствием в исходном спектре).

4.3. Результаты моделирования на основе мультикомбинационного метода Ватанабэ. Процедура моделирования алгоритма самокалибровки по методу Ватанабэ выполнена для ансамбля формата 235. При этом вычисления проводились в соответствии с формулой, которая характеризует вклад каждой головки, входящей в сформированный ансамбль [12] и позволяющей проследить взаимное влияние одного этапа вычислений на другой. Ре-

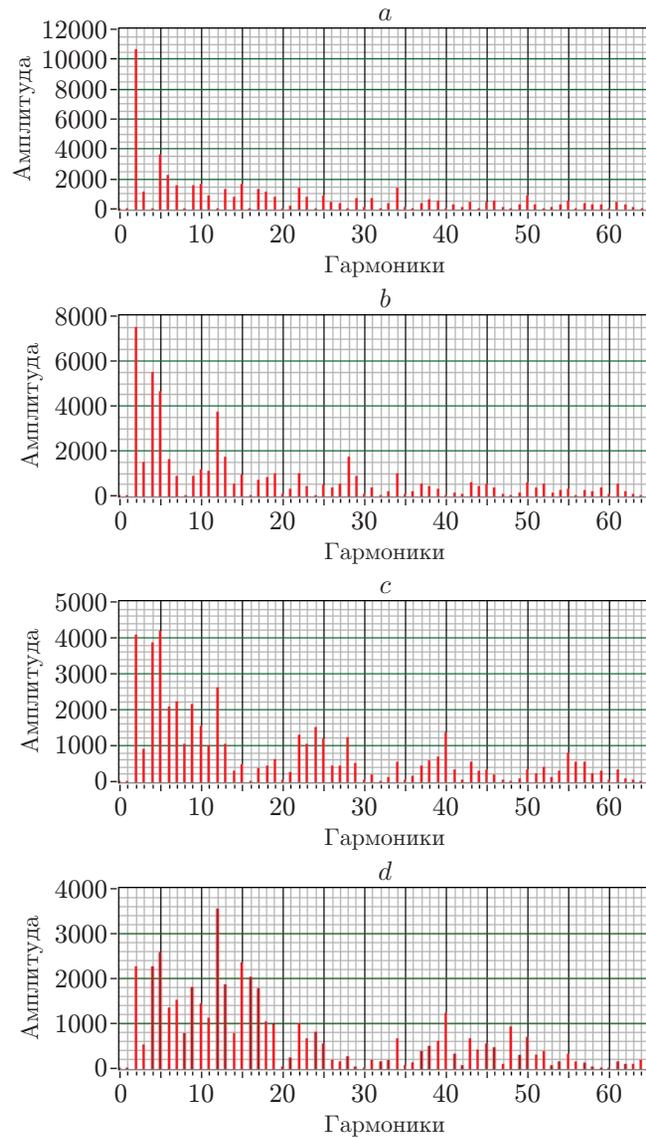


Рис. 6. Амплитудные спектры гармоник на промежуточных этапах: $0-90^\circ$ (*a*), $0-45^\circ$ (*b*), $0-22,5^\circ$ (*c*), $0-11,25^\circ$ (*d*)

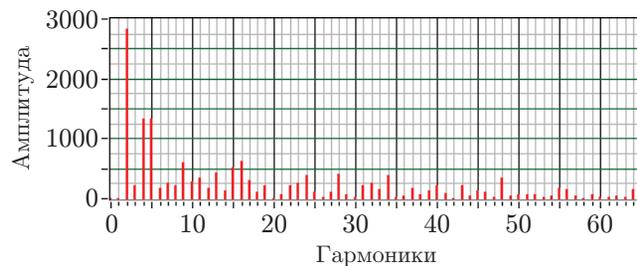


Рис. 7. Спектр кривой остаточного вклада функции F_{err} по методу Масуды

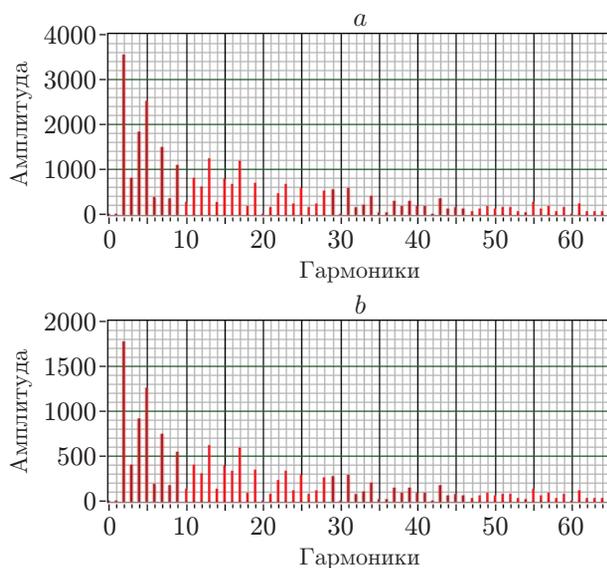


Рис. 8. Спектры: *a* — калибровочной кривой, *b* — остаточного вклада искажающей функции по методу Ватанабэ

результаты моделирования выполнены для $СГ_1$ — общей для всех независимых наборов. Итоговые результаты представлены на рис. 8.

Кроме того, в ходе моделирования оценивались вклады со стороны независимых наборов с 2, 3 и 5 СГ, локализованных в соответствии с требованиями данного метода. Следует отметить, что на промежуточных стадиях каких-либо отклонений от закономерностей EDA-метода не наблюдалось. Итоговый результат самокалибровки представлен на рис. 8, *a*. В соответствии с постулатами данного метода здесь концептуально не должны детектироваться 30-я и кратные ей гармоники. Как и в случае метода Масуды, мультикомбинационный метод Ватанабэ ожидаемо детектирует калибровочную кривую, в которой отсутствуют 30-я и кратные ей гармоники, принципиально недоступные для учёта. Но модельный эксперимент показал также, что и в случае метода Ватанабэ наблюдается неидеальное воспроизведение доступных для детектирования гармоник. Корни этого явления лежат в результатах промежуточных процедур. Набор из двух СГ ожидаемо детектирует только нечётные гармоники; набор из трёх СГ детектирует пары гармоник (1, 2; 4, 5 и т. д.); набор из пяти СГ детектирует цуги гармоник (1, 2, 3, 4; 6, 7, 8, 9 и т. д.). Концептуально в результате сложения выходных сигналов трёх независимых наборов СГ и их усреднения первая гармоника детектируется без искажений, так как она присутствует во всех трёх наборах гармоник. Вторая гармоника присутствует только в выходных сигналах 2-го и 3-го наборов. Поэтому после сложения трёх сигналов её амплитуда детектируется с некоторой погрешностью. Третья гармоника отсутствует на выходе второго независимого набора СГ. Поэтому она также детектируется с такой же погрешностью. Шестая гармоника присутствует в выходном сигнале только 3-го набора и по этой причине детектируется со значительной погрешностью. Подобный анализ можно проделать для любой другой гармоники. Для формата 235 на рис. 8 с точностью до $2U_m/3$ детектируются гармоники с номерами 2, 3, 4, 5, 8, 9, 14, 16, ... С невысокой точностью (на уровне $U_m/3$) детектируются гармоники 6, 10, 12, 15, 18, ... Полностью не детектируются 30-я и кратные ей гармоники. Остаточный вклад искажающей функции F_{err} в результаты измерений можно оценить в первом приближении, используя рис. 8, *b*, из которого видно, что многие гармоники калибровочной кривой, детектируемой с помощью

данного метода, выявляются с заметными погрешностями.

5. Результаты моделирования. В разд. 4 представленной работы были проанализированы с метрологических позиций основные алгоритмы самокалибровки, разработанные к настоящему времени в гониометрии с целью повышения точности измерений. Установлено, что метрологические свойства ансамблей СГ, локализованных по образующей ИР с регулярным шагом (МПУ и EDA-метод), заметно выше аналогичных характеристик ансамблей СГ с нерегулярным шагом (метод Масуды, метод Ватанабэ, VEDA-метод и др.). При одинаковом числе используемых СГ свойства последних заметно различаются между собой по способности формировать адекватную по точности калибровочную кривую. При этом, имея даже одинаковые характеристические гармоники (принципиально не детектируемые каждым из них), они воспроизводят остальные гармоники с разной степенью неопределённости. Среди ансамблей СГ с неравномерной локализацией наиболее близко к норме воспроизводит амплитуды детектируемых гармоник калибровочной кривой мультикомбинационный метод Ватанабэ. Ансамбли СГ с равномерным расположением воспроизводят амплитуды этих гармоник практически идеально. Однако для достижения одинаковых показателей, касающихся номеров характеристических гармоник, в этих ансамблях требуется задействовать в 4–5 раз большее число СГ, чем это требуется в ансамблях с неравномерной локализацией. Откуда следует, что метрологические показатели алгоритмов самокалибровки методов с равномерной локализацией СГ выше, чем аналогичные показатели методов с нерегулярной локализацией, а экономические показатели справедливы с точностью до наоборот.

Безусловно, интересно оценить достоверность полученных оценок погрешности методов. Достоверность количественных показателей результатов моделирования можно оценить, в принципе, путём сравнения данных, сформированных в модельном эксперименте с реальными показателями ОДУП модели ROD-800. Для этого используем показатели реального датчика с заводским номером № 1782999, которые были определены самим производителем. Согласно паспортным данным погрешность этого ОДУП не выходит за пределы $\pm 0,36''$. Этим показателям следует поставить в соответствие результаты моделирования, приведённые на рис. 3, а, которые соответствуют варианту преобразователя с четырьмя СГ, локализованными равномерно с шагом 90° вдоль образующей ИР. Из графика кривой остаточного вклада искажающей функции следует, что ожидаемая погрешность подобного ОДУП лежит в пределах $\pm 0,3''$. Это всего на 15 % отличается от паспортных данных реального изделия. Подобное совпадение результатов позволяет говорить о достаточно высокой достоверности результатов моделирования и получающихся оценок методической погрешности основных алгоритмов самокалибровки ОДУП.

Заключение. Разработанная имитационная модель ОДУП на основе двумерного массива данных, соответствующих значениям искажающей функции F_{err} , сдвинутой по фазе на заданные интервалы, позволяет с точностью до 85 % выявлять параметры остаточного вклада этой функции в итоговую погрешность измерений, а также определять характерные особенности калибровочных кривых, формируемых на основе методов с равномерной или неравномерной локализацией считывающих головок. Результаты моделирования показывают, что существующие в настоящее время методы самокалибровки ОДУП, основанные на регулярной локализации считывающих головок, гарантируют более высокую точность измерений по сравнению с методами, основанными на применении нерегулярной локализации.

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственная регистрация № 121042900050-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кирьянов В. П., Кирьянов А. В.** Применение когерентных решётчатых фильтров в гониометрии // Автометрия. 2021. **57**, № 6. С. 49–59. DOI: 10.15372/AUT20210605.
2. **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. P. 1–10.
3. **Бурнашев М. Н., Павлов П. А., Филатов Ю. В.** Разработка прецизионных лазерных гониометрических систем // Квантовая электроника. 2013. **43**, № 2. С. 130–138.
4. **Ионак В. Ф.** Приборы кинематического контроля. М.: «Машиностроение», 1981. 129 с.
5. **Бачиш Е. А.** Методы воспроизведения единицы плоского угла // Гироскопия и навигация. 2006. **53**, № 2. С. 105–112.
6. **Masuda T., Kajitani M.** An automatic calibration system for angular encoders // Precision Eng. 1989. **11**, N 2. P. 95–100.
7. **Watanabe T., Fujimoto H., Nakayama K. et al.** Automatic high-precision calibration system for angle encoder // Proc. SPIE. 2001. **4401**. P. 267–274.
8. **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**, Iss. 6. 065002.
9. **Ishii T., Taniguchi K., Yamazaki K., Aoyama H.** Development of super-accurate angular encoder system with multi-detecting heads using VEDA method // Journ. Adv. Mechanical Design, Syst., and Manufact. 2018. **12**, N 5. P. JAMDSM0106.
10. **Probst R., Just A.** Recent developments in angle encoder calibration at the PTB // Proc. of the 186th PTB-Seminar. Braunschweig, Germany, Nov. 2003. P. 117.
11. **Kim J., Kim W., Kang C.** Precision angle comparator using self-calibration of scale errors based on the equal-division-averaged method // Rev. Sci. Instrum. 2011. **82**. 116108.
12. **Pat. EP0440833 B1.** Angle measuring device /A. D. I. Ernst. Publ. 02.05.1990. 8 p.
13. **Кирьянов А. В., Зотов А. А., Каракоцкий А. Г. и др.** Оперативный контроль оптических прецизионных углоизмерительных структур // Оптический журнал. 2019. **86**, № 9. С. 60–62.
14. **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.
15. **Portman V., Peschansky B.** Phase-statistical method and device for high precision and high efficiency angular measurements // Precision Eng. 2001. **25**, Iss. 4. P. 309–315.
16. **Yang J., Zeguang D., Ye D., Pinkuan L.** Optimal arrangements of scanning heads for self-calibration of angle encoders // Meas. Sci. Technol. 2017. **28**, Iss. 10. 105013.

Поступила в редакцию 02.03.2022

После доработки 11.04.2022

Принята к публикации 18.05.2022