

Проведенный анализ более полно раскрывает смысл понятий неопределенности и погрешности, в частности, показывает их диаметрально противоположную зависимость от формы сигналов. Полученное соотношение погрешностей между временем и частотой (энергией), также выполняется между координатой и волновым числом (импульсом) в случае измерений пространственных характеристик оптических сигналов.

На основе выполненного исследования можно оценить эффективность существующих методов измерений оптических полей и оптимизировать измерительные схемы одновременного измерения канонически сопряженных физических величин.

Л и т е р а т у р а

1. Мартинсон Л. К., Смирнов Е. В. Квантовая физика. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006.
2. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Кн. I. М.: Сов. радио, 1974.

3. Бард Й. Нелинейное оценивание параметров. М.: Статистика, 1979.

4. Гудмен Дж. Статистическая оптика. М.: Мир, 1988.

5. Смирнов В. И. Фундаментальные ограничения точности совместных измерений параметров оптических полей // Измерительная техника. 2010. № 9. С. 26—31; Smirnov V. I. Fundamental limitations on the accuracy of simultaneous measurements of optical field parameters // Measurement Techniques. 2010. V. 53. N. 9. P. 1002—1010.

6. Мудров В. И., Кушко В. Л. Методы обработки измерений. М.: Сов. радио, 1983.

7. Ринкевичюс Б. С. Лазерная диагностика потоков. М.: Изд-во МЭИ, 1990.

8. Смирнов В. И. Информационные пределы точности измерений параметров оптических полей. Современные методы исследования потоков / Под ред. Б. С. Ринкевичюса. М.: Оверлей, 2011. С. 205—220.

9. Белинский А. В. Квантовые измерения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008.

Дата принятия 21.05.2014 г.

535.24:621.375.8

Повышение точности воспроизведения единицы средней мощности оптического излучения в волоконно-оптических системах передачи путем совершенствования алгоритмов и автоматизации измерительных процессов

А. И. ГЛАЗОВ, А. В. ЗОТОВ, М. Л. КОЗАЧЕНКО, А. Б. СВЕТЛИЧНЫЙ,
С. В. ТИХОМИРОВ

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений,
Москва, Россия, e-mail: mkozachenko@vniiofi.ru

Рассмотрен возможный путь достижения высокой точности измерений средней мощности оптического излучения в волоконно-оптических системах передачи с помощью электрически калибруемого по методу замещения высокоточного калориметрического преобразователя.

Ключевые слова: средняя мощность, излучение, точность, волоконно-оптические системы передачи, калориметрический преобразователь.

The possible way to achieve the high accuracy of optical radiation average power measurements in fiber-optic transmission systems by means of electrically calibrated by the method of substitution of high-precision calorimetric transducer for the operating in this field high-precision measuring systems is considered.

Key words: average power, radiation, accuracy, fiber-optic transmission systems, calorimetric transducer.

В настоящее время во ВНИИОФИ завершена разработка ряда высокоточных эталонных калориметрических систем для воспроизведения единицы средней мощности оптического излучения в волоконно-оптических системах передачи (ВОСП) [1—5]. Их работа базируется на методе замещения средней мощности оптического излучения, воздействующего на эталонный преобразователь, единица которой воспроизводится, на среднюю мощность постоянного

электрического тока. Процесс состоит из предварительной электрической калибровки преобразователя, последующей подачи в него излучения и определения средней мощности с использованием полученного при калибровке значения коэффициента преобразования электрического тока, а также коэффициента эквивалентности замещения, определяемого в процессе аттестации эталонной калориметрической системы. Так, в общих чертах, можно представить алгоритм

воспроизведения единицы средней мощности оптического излучения в созданных эталонных системах.

При разработке высокоточных эталонных систем потребовалось найти и выбрать наиболее эффективные схемы и технические решения входящей в них аппаратуры, которые могут обеспечить достижение требуемой точности воспроизведения. В результате были созданы прецизионные эталонные калориметрические преобразователи средней мощности оптического излучения в ВОСП и системы калибровки, включающие высокостабильные источники постоянного электрического тока. Также были выбраны наиболее точные мультиметры для измерений этого тока и напряжения при калибровке, нановольтметры для измерений выходных сигналов преобразователей, метеоскопы для контроля параметров окружающей среды и внесения определенных поправок в результаты измерений. Кроме того, большое внимание уделено поиску и выбору оптимальных решений оптических схем созданных эталонных систем. В их состав, помимо стабилизированных источников излучения, входили передающие излучение волоконно-оптические кабели, оптические затворы, делители потоков излучения на эталонные и контрольные каналы, средства измерений средней мощности излучения в контрольных каналах и ряд других элементов.

Созданные эталонные системы оснащены компьютерной техникой для автоматического управления работой всей входящей в их состав аппаратуры и обработки получаемой от нее измерительной информации с представлением результатов в виде таблиц и протоколов.

Результатом выполнения всех перечисленных работ стало, в частности, создание и последующее совершенствование действующего в настоящее время Государственного первичного специального эталона ГЭТ 170—2011, возглавляющего государственную поверочную схему [4], доработка которой завершена в 2013 г., а ввод в действие запланирован на 2015 г.

Однако разработка, выбор и применение в составе эталонных систем наиболее точной из существующей измерительной аппаратуры еще не гарантирует достижение столь же высокой точности для эталонной системы в целом. Это связано с тем, что на работу подобных систем и ее отдельных элементов может оказывать существенное негативное влияние целый ряд факторов. Для наиболее полного учета и нейтрализации этого влияния требуется достаточно точная и корректная оценка значений параметров, характеризующих эти факторы в конкретные моменты времени, и исследование влияния каждого фактора на результаты измерений, выявление соответствующих зависимостей и определение поправочных коэффициентов. Эффективное решение подобных задач, применительно к работе высокоточных эталонных систем, погрешности которых в настоящее время оцениваются значениями порядка 0,1 % и меньше, предполагает проведение весьма тщательных исследований.

Справедливость таких утверждений подтверждена на примере оценки влияния на работу эталонного преобразователя средней мощности оптического излучения ПСМ.ПМ такого фактора, как температура окружающей среды. Подробное описание этого преобразователя, являющегося одним из основных элементов ГЭТ 170—2011, представлено в [1]. Коэффициент преобразования средней мощности ГЭТ 170—2011 составляет 250 мкВ/мВт, а температурная

чувствительность используемой в нем термобатареи равна 5 мВ/°С. Как показал накопленный опыт эксплуатации эталонных систем, при проведении метрологических работ самые востребованные уровни энергетического воздействия на эталонный преобразователь близки к 1 мВт. При таком уровне выходной сигнал преобразователя будет 250 мкВ, что соответствует реакции его термобатареи на изменение температуры всего лишь на 0,05 °С. Если исходить из того, что погрешность созданных эталонных систем составляет 10^{-3} отн. ед., и оценить в абсолютных единицах соответствующие ей изменения температуры спаев термобатареи преобразователя, то они составят $5 \cdot 10^{-5}$ °С. Аналогичным образом можно провести приблизительную оценку температурного режима работы термобатареи у ПСМ.ПМ в процессе его электрической калибровки. Например, если реализуемое на практике среднее квадратическое отклонение (СКО) результатов измерений коэффициента преобразования средней мощности постоянного электрического тока составляет 10^{-5} , то соответствующие ему изменения температуры спаев термобатареи преобразователя можно оценить на уровне $5 \cdot 10^{-7}$ °С.

Приведенные примеры позволяют, во-первых, составить некоторое представление о тех температурных режимах, которыми характеризуется работа приемного и чувствительного элементов эталонного калориметрического преобразователя в процессе воспроизведения единицы средней мощности излучения, а, во-вторых, сделать вывод о необходимости применения эффективной защиты приемного и чувствительного элементов преобразователя от разных видов внешних тепловых помех. Такая защита была реализована в конструкции преобразователя ПСМ.ПМ в результате использования массивного медного термостата (внутри которого располагаются элементы), каскада теплоизолирующих и тепловыравнивающих оболочек и внешнего корпуса прибора, которые охватывают термостат снаружи и защищают его от непосредственного контакта с окружающей средой. Этим значительно уменьшены как колебания, так и скорости постоянных медленных изменений температуры приемных элементов преобразователя, а также скорости дрейфа их выходных сигналов, что, в свою очередь, привело к значительно уменьшению случайных погрешностей измерений.

Другое негативное проявление температурного фактора связано с зависимостью коэффициента преобразования средней мощности от температуры. Данная зависимость обусловлена теплопроводностью материала градиентного приемного элемента преобразователя и чувствительностью его термобатареи. Для прибора ПСМ.ПМ значение относительной чувствительности коэффициента преобразования средней мощности составляет $0,0003$ °С⁻¹ при изменении температуры окружающей среды на 1 °С. Следовательно, при реализации эталонных систем, характеризующихся погрешностью на уровне 0,001 отн. ед. и менее, эффективное подавление температурной составляющей этой погрешности связано с необходимостью контроля изменений температуры приемного элемента эталонного преобразователя с разрешением не ниже 0,1 °С. Это происходит потому, что в процессе воспроизведения единицы средней мощности могут наблюдаться некоторые изменения температуры в эталонном помещении за время, отделяющее операции электрической калибровки преобразователя от последующих оптических измерений. Эти изменения могут быть выз-

ваны разными факторами, в том числе и суточным ходом температуры в конкретном помещении.

Наконец, при работе эталонного калориметрического преобразователя температурный фактор может проявляться и в виде зависимости коэффициента преобразования средней мощности (электрического тока, излучения) от ее уровня. Процесс воспроизведения единицы средней мощности предусматривает проведение электрической калибровки эталонного преобразователя при уровне средней мощности постоянного электрического тока, максимально приближенном к уровню средней мощности последующего оптического воздействия. Однако на практике их значения отличаются. Учитывая названные ранее высокие требования к погрешности воспроизведения единицы средней мощности, влияние такого фактора в процессе измерений исключать нельзя.

Следует отметить, что температурный фактор может оказывать различное влияние не только на работу рассмотренного эталонного калориметрического преобразователя, но и на другую аппаратуру из состава эталонной системы, а именно — на электрические и оптические источники, нановольтметры, мультиметры и фотоэлектрические приемники излучения. Особенно важен учет влияния этого фактора на работу мультиметров, так как единица средней мощности оптического излучения в созданных эталонных системах воспроизводится по методу замещения с использованием именно электрических стандартов.

На измерительные процессы при воспроизведении единицы средней мощности оптического излучения в ВОСП оказывают негативное влияние различные факторы. Учесть и наиболее эффективно нейтрализовать их влияние можно четкой организацией всего измерительного процесса, с фиксированием показаний всей входящей в состав эталонной системы аппаратуры в точно заданные моменты времени. Все это было реализовано на практике в алгоритмах целого ряда последовательных измерительных операций, совокупность которых обеспечила полноту и завершенность процесса воспроизведения единицы.

Поскольку эталонные системы базируются на калориметрических преобразователях, характеризующихся значительной инерционностью, при разработке алгоритмов должное внимание уделено выбору динамических режимов проводимых измерительных процессов. Исходили из того, что постоянная времени эталонного калориметрического преобразователя РСМ.ПМ составляет $\tau = 24$ с, а нарастание и релаксация выходных сигналов его термобатареи носит экспоненциальный характер. В этом случае достаточно полное завершение переходных процессов при нагреве или остывании приемного элемента преобразователя, соответственно после начала или прекращения энергетического воздействия, вполне обеспечивается за 5-минутный промежуток времени, что соответствует временному интервалу, превышающему 12τ . За это время выходной сигнал преобразователя не достигает теоретического максимума на кривой выхода или минимума на кривой релаксации и оценивается значением менее $6 \cdot 10^{-6}$ отн. ед., т. е. он может быть отнесен к разряду пренебрежимо малых отклонений. При работе в режиме последовательных многократных измерений выходного сигнала преобразователя (после завершения 5-минутного переходного процесса) все сказанное ранее в полной

мере можно отнести лишь к первому из этих измерений, а начиная со второго и всех последующих наблюдений в их серии, учет влияния рассматриваемого фактора лишен всякого смысла из-за ничтожности источника погрешности, особенно на фоне вызванного внешними факторами некоторого дрейфа нулевого уровня выходного сигнала преобразователя. Кроме того, рассматриваемые переходные режимы происходят как на стадии электрической калибровки, так и при последующем оптическом воздействии на преобразователь, и при этом совершенно идентичны. Поэтому их влияние на результаты измерений носят систематический характер и связанная с этим фактором погрешность автоматически исключается. В принципе, влияние рассмотренного фактора на погрешность эталонной системы могло бы проявиться, как некоторое увеличение дисперсии результатов в сериях измерений и соответствующих СКО при электрическом и оптическом воздействиях на преобразователь из-за искажения результата лишь первого из многократных измерений. На практике это влияние ничтожно, что показывают СКО многочисленных результатов электрической калибровки преобразователя.

Интервал между последовательными измерениями в сериях наблюдений рабочих выходных сигналов работающего под электрической или оптической нагрузкой преобразователя составляет 1 мин, т. е. соответствует значению $2,5\tau$. За это время экспонента не доходит теоретического минимума или максимума на $0,07$ отн. ед. Исходим из того, что нестабильность эталонных источников постоянного электрического тока и оптического излучения за 30 мин составляет соответственно $0,01$ и $0,1\%$ ($0,0001$ и $0,001$ отн. ед.). Тогда погрешность, связанная с частичной незавершенностью переходных процессов формирования выходных сигналов преобразователя в режимах электрической калибровки и оптических измерений (даже при самой грубой ее оценке сверху) не превысит $0,0007$ и $0,007\%$, соответственно.

Алгоритм воспроизведения. Алгоритм реализованного в эталонной системе измерительного процесса воспроизведения единицы средней мощности оптического излучения можно разбить на три стадии.

Первая стадия — в течение двух часов обеспечивается необходимый прогрев и тестирование всей входящей в состав эталонной системы аппаратуры, контроль за температурой окружающей среды в эталонном помещении и скоростью ее изменения, а также дрейфом нулевого уровня выходного сигнала преобразователя и его скоростью. Кроме того, проводятся вспомогательные операции по определению конкретных значений параметров постоянного электрического тока для обеспечения максимального приближения уровня его средней мощности (на стадии электрической калибровки эталонного преобразователя) к уровню средней мощности оптического излучения ВОСП, воздействующего на этот преобразователь на следующей стадии — воспроизведении ее единицы. По результатам анализа полученной информации делается вывод о готовности эталонной системы и входящей в нее аппаратуры для проведения дальнейших работ по воспроизведению единицы средней мощности оптического излучения, в соответствии с последующими стадиями измерительного процесса.

Вторая стадия — электрическая калибровка по методу замещения эталонного преобразователя с передачей ему единицы средней мощности постоянного тока от электри-

ческих стандартов. Алгоритм выполнения работ состоит из следующих команд и операций:

фиксирование температуры окружающей среды t_3 , нулевого уровня выходного сигнала преобразователя $V_{3н}$ и последующая подача электрического тока в эталонный преобразователь;

проведение через отрезок времени $T_n = 12\tau$ (соответствует принятой длительности переходного процесса нагревания приемного элемента после начала подачи тока в преобразователь) серии n синхронных измерений (интервал между ними $T_{и} = 2,5\tau$) соответствующего количества рабочих выходных сигналов преобразователя под нагрузкой $V_{31}, \dots, V_{3n}$, электрического тока $I_1, \dots, I_n$, напряжения $U_1, \dots, U_n$ и прекращение подачи тока в преобразователь;

фиксирование через промежуток времени T_n конечного значения выходного сигнала $V_{3к}$, т. е. сразу после завершения переходного процесса остывания приемного элемента после прекращения электрического воздействия на преобразователь.

Затем на этой стадии автоматически обрабатывается полученная измерительная информация и определяется каждый единичный i -й в серии из n текущих значений коэффициент преобразования средней мощности постоянного электрического тока как

$$K_{3i} = \{V_{3i} - V_{3н} + [T_n + (i-1)T_{и}] \times \\ \times (V_{3н} - V_{3к}) / [2T_n + (n-1)T_{и}] \} / (I_i U_i), \quad (1)$$

где i — номер текущего измерения соответствующего параметра в серии из n наблюдений.

Выражение (1) позволяет, исходя из величины реально отклонения нулевого уровня выходного сигнала преобразователя ($V_{3н} - V_{3к}$) за полное время $2T_n + (n-1)T_{и}$ процесса его электрической калибровки, определить среднюю скорость этого отклонения. Это, в свою очередь, позволяет оценить значения неконтролируемых (после начала энергетического воздействия) отклонений, соответствующих моментам фиксирования каждого i -го значения рабочего выходного сигнала работающего под электрической нагрузкой преобразователя V_{3i} , т. е. через промежуток времени $T_n + (i-1)T_{и}$ после измерения начального значения $V_{3н}$.

Таким образом, практическая реализация отраженного в (1) алгоритма измерений и обработки измерительной информации на стадии электрической калибровки эталонного преобразователя позволяет исключить из каждого i -го в серии из n измеряемых значений аддитивных выходных сигналов преобразователя V_{3i} , его нулевую составляющую и, следовательно, оценить чистое приращение этого сигнала, вызванное лишь воздействием электрического тока.

Об эффективности выбранного режима электрической калибровки эталонного преобразователя свидетельствуют результаты многих серий измерений коэффициента преобразования средней мощности K_{3i}^{cp} постоянного электрического тока, оценка СКО среднего значения которого (при 10 наблюдениях в серии) при жестком контроле состояния окружающей среды в эталонном помещении достигала 0,0009—0,001 %, а в более свободном режиме этого контроля редко превышала 0,004—0,006 %, отражая не только погрешности преобразователя, но и случайные погрешности используемой при его электрической калибровке аппаратуры, а также погрешности, вызванные внешними факторами.

Вторая стадия заканчивается автоматической выдачей протокола с таблицей результатов электрической калибровки эталонного преобразователя, в которой указаны зафиксированные единичные i -е значения каждого из измеряемых параметров и результаты их обработки, а также средние значения коэффициента преобразования средней мощности электрического тока K_{3i}^{cp} и СКО результата его измерения.

Третья стадия — заключительная, включает измерение единицы средней мощности излучения в ВОСП с помощью электрически откалиброванного эталонного преобразователя и воспроизведение таким образом этой единицы с учетом эквивалентности замещения. Также выполняется оптическая калибровка контрольного фотоэлектрического ваттметра, используемого в дальнейшем при передаче единицы средней мощности излучения от эталонной системы к поверяемым средствам измерений. Алгоритм этих работ (в части измерений температуры окружающей среды t_0 , начального сигнала $V_{он}$, серии n рабочих значений выходных сигналов $V_{о1}, \dots, V_{он}$ находящегося под оптической нагрузкой преобразователя, фиксирования конечного значения $V_{ок}$ этого сигнала) практически полностью соответствует рассмотренному алгоритму электрической калибровки преобразователя. Отличие заключается только в том, что вместо электрического оказывается оптическое воздействие на преобразователь, а вместо параметров электрического тока синхронно с рабочими выходными сигналами эталонного преобразователя фиксируется каждое из n показаний средней мощности излучения контрольного фотоэлектрического ваттметра $P_{к1}, \dots, P_{кn}$.

Далее в автоматическом режиме обрабатывается полученная измерительная информация, в том числе определенные на предыдущей стадии температура окружающей среды t_3 и среднее значение коэффициента преобразования постоянного электрического тока K_3^{cp} , а также его отно-

сительная чувствительность K_t к изменению температуры окружающей среды на 1 °С и коэффициент эквивалентности замещения K_{33} , значения которых определены на стадии метрологической аттестации эталонной системы. При этом значения каждого единичного i -го в серии из n воспроизводимых значений средней мощности оптического излучения P_{oi} вычисляются по формуле

$$P_{oi} = \{V_{oi} - V_{он} + [T_n + (i-1)T_{и}](V_{он} - V_{ок}) / [2T_n + (n-1)T_{и}]\} / \\ / (K_{33} K_3^{cp} [1 + K_t(t_0 - t_3)]).$$

Третья стадия заканчивается автоматической выдачей протокола с представленными в табличной форме результатами всех измерений и обработки информации с указанием каждого из n воспроизведенных значений единицы средней мощности P_{oni} оптического излучения, а также их среднего значения P_0^{cp} . При этом, по результатам воспроизведенных значений $P_{о1i}, \dots, P_{они}$ и соответствующих им синхронных показаний контрольного измерителя $P_{к1}, \dots, P_{кn}$, аналитически оценивается каждое из n текущих значений коэффициента пересчета показания контрольного прибора $K_{pi} = P_{ki} / P_{oi}$. Также определяется их среднее значение K_p^{cp} и СКО результатов измерений среднего значения при 10 наблюдениях.

Таким образом, разработанный алгоритм работы созданных эталонных систем позволяет не только воспроизводить единицу средней мощности оптического излучения, но и выполнять одну из ключевых операций ее передачи поверяемым средствам измерений — калибровку фотоэлектрического ваттметра из состава эталонной системы в качестве проходного средства измерений этого параметра.

Выводы. Опыт эксплуатации созданной эталонной калориметрической системы воспроизведения единицы средней мощности оптического излучения в ВОСП показал, что автоматизация процессов управления входящей в ее состав аппаратурой, а также измерений и обработки получаемой информации в соответствии с рассмотренным алгоритмом, позволяют снизить погрешности воспроизведения до 0,1 %, обеспечивая при этом значительное повышение надежности, эффективности и производительности метрологических работ при одновременном снижении их трудоемкости.

Рассмотренный алгоритм измерений и обработки полученной информации может быть успешно использован не только в сфере эталонных калориметрических систем воспроизведения единицы средней мощности оптического излучения в ВОСП, но и в области лазерного излучения, а также при создании высокоточных калориметрических рабочих эталонов и даже рабочих средств измерений средней мощности излучения ВОСП и лазеров в случае возникновения необходимости значительного повышения требований к точности ее измерений.

Л и т е р а т у р а

1. Глазов А. И. и др. Обеспечение единства измерений средней мощности оптического излучения в волоконно-оптических системах передачи // Измерительная техника. 2000. № 8. С. 31—35; Glazov A. I. et al. Unification of measurements of the average power of optical radiation in fiber-optic transmission systems // Measurement Techniques. 2000. V. 43. N. 8. P. 679687.
2. Глазов А. И. и др. Обеспечение единства измерений средней мощности оптического излучения в волоконно-оптических системах передачи // Метрология и измерительная техника в связи. 1999. № 4. С. 20—24.
3. Tihomirov C. V. et al. Comparison of reference standards for measurements of optical-fibre power // Metrology. 2000. N. 37. P. 347—350.
4. ГОСТ 8.575—2005. Государственная поверочная схема для средств измерений длины и скорости распространения сигнала в световоде, средней мощности, ослабления и длины волны оптического излучения для волоконно-оптических систем связи и передачи информации.
5. Глазов А. И. е. а. Погрешности высокоточных измерений средней мощности оптического излучения в ВОСП и пути их минимизации // Измерительная техника. 2014. № 4. С. 12—15.

Дата принятия 18.03.2014 г.

62.503.51

Оптоэлектронное устройство дистанционных измерений геометрических параметров профильных объектов

Б. В. СКВОРЦОВ, А. Н. МАЛЫШЕВА-СТРОЙКОВА, И. Ю. ЖИГАНОВ

Самарский государственный аэрокосмический университет им. ак. С. П. Королева (национальный исследовательский университет) Самара, Россия, e-mail:aps@ssau.ru

Рассмотрено оптоэлектронное лазерно-телевизионное устройство дистанционных измерений геометрических параметров изделий сложной пространственной конфигурации. Приведена структурная схема и основные математические соотношения, описывающие процедуры калибровки и измерений, основанные на обработке изображений контролируемого объекта, сделанных под разными углами. Получена возможность проводить полный анализ геометрических размеров изделия.

Ключевые слова: геометрические параметры, сложные профили, дистанционное измерение, калибровка, угол съемки, лазерно-телевизионное устройство.

The optoelectronic laser-television device for remote measurements of complex spatial configuration products geometric parameters is considered. The block diagram of the device and the basic mathematical relations describing the calibration and measurement procedures based on the processing of controlled object images taken at different shooting angles is presented. The possibility to carry out the complete analysis of product geometric dimensions was received.

Key words: geometric parameters, complex profiles, remote measurement, calibration, shooting angles, laser-television device.

Важной задачей приборостроения является создание средств высокопроизводительного контроля геометрических параметров изделий сложной формы, к которым относятся трубы, емкости, лопасти двигателей, корпуса и эле-

менты летательных аппаратов, строительные конструкции. Измерение геометрических параметров данных изделий контактными методами достаточно затруднительно. Под геометрическими параметрами подразумевают линейные