

Моделирование работы измерителя дальности видимости

В. В. Попов, email: copybook05@yandex.ru ¹

В. А. Повхлеб ¹

А. А. Уткин ²

¹ ВУНЦ ВВС «ВВА имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»
(г. Воронеж)

² ООО «ЛОМО МЕТЕО»

***Аннотация.** В статье рассматривается процесс моделирования работы измерителя дальности видимости в сложных атмосферных условиях. Предложены усовершенствованные алгоритмы применения математической модели стабилизации излучения и динамического изменения измерительной базы.*

***Ключевые слова:** Дальность видимости, трансмиссометр, нефелометр, погрешность измерений, конструктивные решения, модельные исследования.*

Введение

Измерители метеорологической дальности видимости (МДВ) по принципу измерений делятся на трансмиссометры и нефелометры. При этом нефелометры также являются датчиками текущей погоды (определяют вид определенных явлений погоды) [1].

Наибольшее распространение в России получили измерители ФИ-3 и ЛТ-31. Измерители ИМДВ-01 (фактически измеритель СФ-1, сертифицированный российским производителем) поставлялись непродолжительное время на гражданские авиационные метеорологические станции Росгидромета и в настоящее время не имеют действующего свидетельства об утверждении типа средства измерения (СИ). Информация об опыте их эксплуатации недоступна, однако можно предположить, что из-за упрощенной конструкции стоек и кожухов, а также отсутствия обдува защитного стекла, измеритель требует регулярной калибровки.

Нефелометры в сравнении с трансмиссометрами имеют простую и недорогую конструкцию, менее требовательны к месту установки и обслуживанию и, как правило, имеют меньшую стоимость. Однако, с точки зрения алгоритмов обработки измерений, нефелометры значительно сложнее трансмиссометров. Кроме того, нефелометры

нечувствительны к частицам атмосферы определенного размера, а также к частицам, хорошо поглощающим свет [2].

С другой стороны, нефелометры – это отличный инструмент для проведения автокалибровки трансмиссометров при хорошей видимости, что, несомненно, повышает качество измерений и облегчает их эксплуатацию.

Для корректной интерпретации интенсивности рассеивания светового потока в МДВ необходимы: большой исследовательский опыт применения нефелометров в различных условиях эксплуатации, применение дополнительных датчиков, позволяющих определять состав исследуемого аэрозоля, температуру и уровень освещенности. Одним из лидеров рынка в части опыта установки и эксплуатации нефелометров является компания Vaisala. На основе анализа состава датчиков и вариантов поставки, можно уверенно говорить о необходимости комплексного подхода к измерениям МДВ посредством нефелометров, и снабжать устанавливаемые датчики вспомогательными измерительными системами, такими как: датчики осадков и яркости фона. Кроме того, стоит отметить, что в разных моделях нефелометра по-разному взаимно расположены приемник и излучатель, в частности их наклон к линии горизонта и расстояние между ними [3].

Также к проблемам нефелометров можно отнести непрозрачность их метрологического обеспечения, поэтому отнесение разрабатываемого нефелометра к категории «индикаторов» (измерителей с ненормированными метрологическими характеристиками) обосновано, и в тоже время разработка данного прибора важна для дальнейшего его развития и совершенствования [4].

Принцип действия разрабатываемого измерителя видимости ФИ-5 основан на измерении степени ослабления интенсивности световых импульсов после их прохождения через слой атмосферы, ограниченный длиной измерительной базы. Особенностью ФИ-3 и ФИ-5 является то, что конструктивно обе базовые линии (короткая и удвоенная) пространственно совмещены благодаря дополнительному фотоприемному устройству (ФПУ), встроенному в блок отражательный (БО), что позволяет производить измерения в широком диапазоне МДВ.

Разработка ФИ-5 производится в соответствии с предложениями, изложенными в эскизном проекте, направленными на повышение эксплуатационных и метрологических характеристик измерителя:

улучшение приспособленности измерителя к эксплуатации вне защитных сооружений;

обновление и унификация элементной базы, технических и технологических решений, повышение уровня межпроектной унификации с выпускаемыми комплексами;

повышение временной стабильности, в части периодичности перекалибровки измерителя при хорошей видимости;

обеспечение возможности настройки длины измерительной базы вне предприятия-изготовителя).

1. Конструктивные решения

В соответствии с результатами моделирования предлагаются следующие конструктивное исполнение и конструкторские решения:

конструкция стоек крепления блоков фотометрического (БФ) и отражательного (БО) разрабатывается таким образом, чтобы настроенная на месте эксплуатации оптическая система оставалась в рамках расчетных допустимых пределов при воздействии ветровой и снеговой нагрузки, а также при изменении температуры воздуха в широком диапазоне;

конструкция корпусов БО и БФ, в том числе защитные бленды разрабатываются таким образом, чтобы минимизировать загрязнение защитных стекол активными (принудительный обдув) и пассивными методами (установка дефлекторов, отклоняющих ветровой поток). Проект конструкции бленды с устройством обдува защитного стекла приведен на рисунке 1.

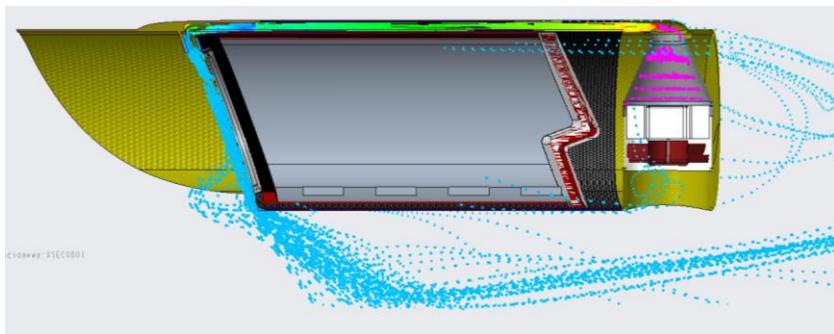


Рис. 1. Проект конструкции бленды и устройства обдува защитного стекла

Результаты моделирования показывают, что данное решение эффективно защищает от попадания снега и капель дождя и снега при ветре 30 м/с. Кроме того, прорабатывается возможность обеспечения питания измерителя датчика фона и защиты его линий связи через БП

ФИ-5 (таким образом, при совместном их размещении упростится монтаж и сократится количество составных частей).

2. Структурная схема измерителя

Для повышения временной стабильности, обновления и унификации элементной базы электронные схемы измерителя будут полностью переработаны, в соответствии со структурной схемой ФИ-5 (рисунок 2).

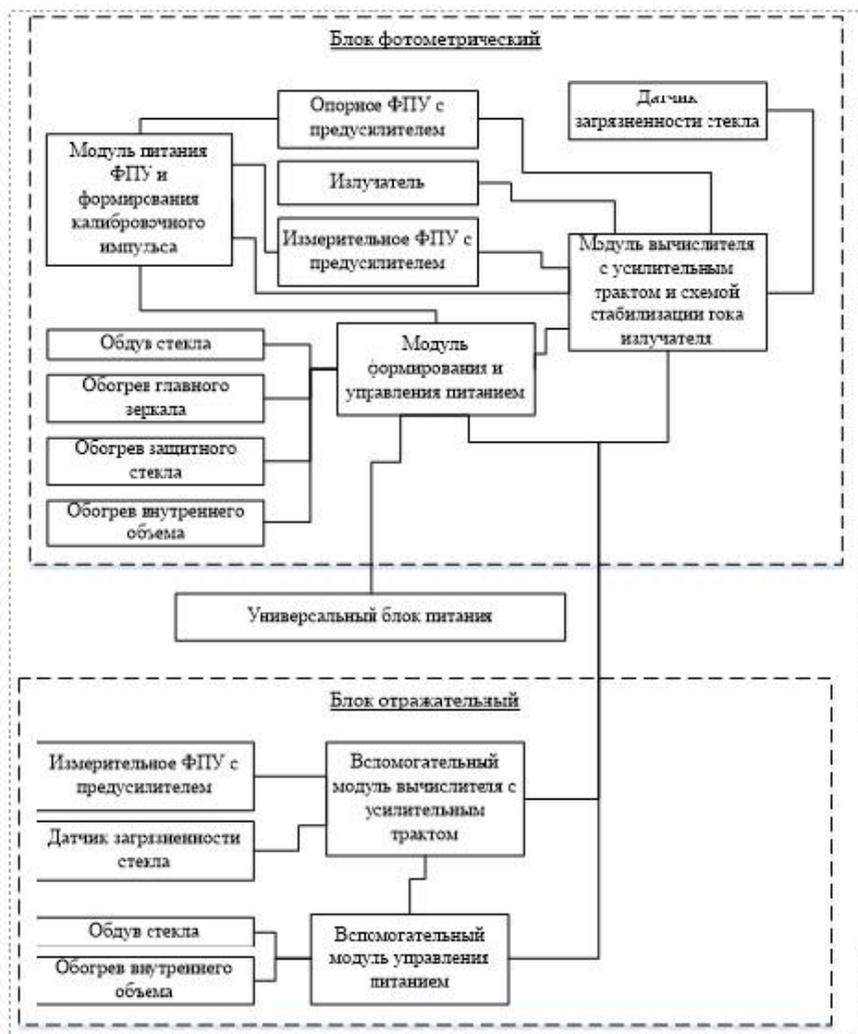


Рис. 2. Структурная схема ФИ-5

Необходимость термостабилизации внутренних объемов обусловлена рабочим диапазоном температур основных электронных компонентов – ФПУ и светодиода высокой яркости. Управление контурами обогрева осуществляется модулем вычислителя (контроллером), обратная связь обеспечивается установкой

термодатчиков в контролируемых зонах, соответствующих конкретному контуру обогрева. Обдув защитного стекла используется при плохой видимости и также контролируется модулем вычислителя.

Важнейшим элементом измерителя является светодиод белого свечения, стабильность излучения которого достигается модуляцией питающего напряжения в пределах формируемого видимого глазом импульса света, с обратной связью по потребляемому току. Контролируя с большой скоростью ток потребления светодиода и осуществляя автоподстройку частоты модуляции его питающего напряжения контроллер может удерживать такой режим работы светодиода, при котором его яркость и спектральная характеристика изменяются незначительно.

Начало работы светодиода, а именно момент его выход на рабочий режим будет являться триггером для начала параллельных аналого-цифровых преобразований и интегрирования сигналов, получаемых с опорного и измерительного устройств. Данный подход будет впервые применен в ФИ-5, реализация которого стала возможной в том числе за счет внедрения унифицированного с измерителем высоты облаков высокопроизводительного процессора на базе ядра Cortex-M4.

Помимо стабилизации излучения, существенного улучшения временной стабильности измерителя предполагается достигнуть за счет внедрения в схему питания опорного светодиода, управляемого контроллером и предназначенного для взаимокалибровки устройств.

Для контроля степени загрязнения стекол БФ и БО на внутренней стороне стекол будут установлены датчики контроля загрязнения стекла, принцип действия которых будет заключаться в измерении прозрачности по переотражению света вдоль стекла (чем загрязненнее внешняя поверхность стекла, тем больше света поступает от излучателя в приемник). При превышении порогового уровня загрязнения стекла оператору будет сигнализироваться необходимость очистки стекла.

3. Реализация алгоритмов расчета длины измерительной базы

Измеритель должен обеспечивать измерение МДВ (S) в диапазоне от 30 до 10 000 м с относительной погрешностью:

$\pm 5\%$ при $30 \leq S \leq 1500$ м;

$\pm 10\%$ при $1500 < S \leq 3000$ м;

$\pm 20\%$ при $3000 < S \leq 10\,000$ м,

при этом выбор длины измерительной базы не оговорен (предоставлен разработчику). В рамках эскизного проекта было сформулировано предложение о включении в функционал измерителя возможности динамического изменения измерительной базы в зависимости от места эксплуатации. Для реализации данных требований

выполнены модельные расчеты, направленные на определение оптимального значения измерительной базы с точки зрения погрешности измерений и допустимых границ ее изменения.

По своему принципу действия измеритель ФИ-5 – это трансмиссометр, важнейшим преимуществом которого является математическая простота и полная прозрачность метрологического обеспечения.

Основополагающим физическим законом, предопределяющим принцип работы трансмиссометров является закон Бугера-Ламберта

$$I(l) = I_0 e^{-k_\lambda l}, \quad (1)$$

где: l – толщина слоя вещества; $I(l)$ – интенсивность света, прошедшая слой толщиной l ; I_0 – интенсивность света на входе в вещество; k_λ – показатель поглощения вещества от длины волны излучения λ .

Из формулы 1 выражается коэффициент направленного пропускания атмосферы τ , определяемый как отношение интенсивности света, прошедшего участок трассы, ограниченный длиной измерительной базы l к интенсивности излученного света

$$\tau = \frac{I(l)}{I_0} = e^{-k_\lambda l}. \quad (2)$$

Математический переход от коэффициента направленного пропускания τ к метеорологической дальности видимости МДВ (S) выполняется на основании закона Кошмидера, видоизмененного с учетом выражения 2:

$$S = \frac{\ln(1/\varepsilon)}{\ln(1/\tau)} l, \quad (3)$$

где: ε – применяемый порог контрастной чувствительности глаза.

В документе [5] показано, что исследования, проведенные в ряде государств в области дальности видимости предметов, показали, что порог контрастной чувствительности глаза изменяется в зависимости от размеров предмета. Для приблизительно квадратных предметов, расположенных под углом более $0,5^\circ$, применяемый порог контрастной чувствительности глаза (ε) равен $0,02$, а для предметов, находящихся под углом менее $0,15^\circ - 0,05$. Экспериментальные результаты полевых наблюдений, проведенных с помощью черных маркерных плит в широком диапазоне условий видимости, включая туман, подтвердили действительность закона Кошмидера и показали целесообразность использования порога контрастной чувствительности глаза,

приблизительно равного 0,05. ИКАО и Всемирная метеорологическая организация считают, что значение 0,05 является приемлемым для визуальных наблюдений. Таким образом, при базовом расчете диапазона и погрешности измерений МДВ трансмиссомером ФИ-5, необходимо использовать частную форму записи закона Кошмидера

$$S = \frac{\ln(1/0,05)}{\ln(1/\tau)} l. \quad (4)$$

Важным ограничением, накладываемым на метрологические характеристики трансмиссомеров, является неспособность отечественной промышленности изготовить и аттестовать светофильтры. В настоящее время, поверочный комплект светофильтров имеет погрешность 0,1 %, что делает невозможным осуществить метрологический контроль трансмиссометра, обладающего погрешностью измерения коэффициента направленного пропускания τ менее чем 0,3 %.

В связи с этим, несмотря на то, что разрабатываемая для ФИ-5 схематехника позволяет осуществлять измерения τ с большей точностью, метрологически обоснованными являются следующие требования к погрешности измерения коэффициента направленного пропускания:

$$\pm 0,3 \text{ при } 0 \leq \tau \leq 10;$$

$$\pm 0,003 \text{ при } 10 < \tau \leq 100.$$

При решении задачи определения оптимальной длины измерительной базы и возможного диапазона измерений в качестве критерия оптимальности принимается соответствие погрешности измерений требованиям руководящих документов и ее минимизация в диапазоне измерений от 30 до 1000 м.

Аналитическое решение показывает, что требования в части диапазона и погрешности измерений выполняются при длине измерительной базы от 25,1 до 44 м. При длине измерительной базы менее 25,1 м погрешность измерения на верхнем пределе диапазона измерений перестает удовлетворять требованиям руководящих документов, при длине измерительной базы более 44 м возрастает погрешность на нижнем пределе диапазона измерений. Оптимальной длиной измерительной базы является длина 35 м, допустимое отклонение при этом составляет $\pm 7,5$ м. Фактическая длина измерительной базы будет передаваться в прибор при пуско-наладочных работах на месте эксплуатации после проведения соответствующих замеров.

Поведение погрешности в пределах диапазона измерения при базе 35 м в режиме ближней базы (от БФ до БО) представлено на рисунке 3, в режиме дальней базы (БФ до БО и обратно) представлено на рисунке 4. По оси абсцисс (X) отложена МДВ в метрах, по оси ординат (Y) – относительная погрешность измерения МДВ в процентах.



Рис. 3. Распределение погрешности от МДВ в режиме ОБ



Рисунок 3 – Распределение погрешности от МДВ в режиме ОД

Также в измерителе дальности видимости будет предусмотрен механизм калибровки ФИ-5 при хорошей видимости – вручную (по команде оператора) или автоматически (по данным разрабатываемого нефелометра).

Заключение

Этап модельных исследований измерителя дальности видимости показал, что в первую очередь для удовлетворения требований тактико-технического задания стоят задачи по улучшению метрологических и эксплуатационных характеристик, увеличению надежности и технологичности производства с учетом существующей политико-экономической ситуации, и задач снижения зависимости от компонентов импортного производства.

Определено, что важной задачей является усовершенствование алгоритмов стабилизации излучения и динамического изменения измерительной базы.

Литература

1. Аэродромный метеорологический радиотелеметрический информационно-измерительный комплекс (АМРИИК): Руководство по эксплуатации ИКШЮ (ИКШЮ. 416318.001 РЭ). – СПб.: ЛОМО-МЕТЕО, –2016. –56 с.

2. Руководящий документ. РД 52.18.761-2012 Средства измерений гидрометеорологического назначения сетевые. Общие технические требования. – Обнинск. ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». –2012. –137 с.

3. Комиссия по приборам и методам наблюдений. Шестнадцатая сессия. Санкт-Петербург. 10-16 июля 2014 г. Сокращенный окончательный отчет с резолюциями и рекомендациями, ВМО-№ 1138. – 97 с.

4. Руководство по системам метеорологических наблюдений и распространения информации для метеорологического обслуживания авиации. ВМО-№ 731, Издание 2014 г. –56 с.

5. Руководство по практике наблюдения за дальностью видимости на ВПП и передачи сообщений о ней. ИКАО-Дос 9328 AN/908. –2005. –87 с.