

УДК 629. 735. 05: 621.38 (045)

А. П. Козлов, канд. техн. наук

БОРТОВОЙ ПЛОТНОМЕР АВИАЦИОННОГО ТОПЛИВАИнститут аэрокосмических систем управления НАУ, e-mail: iesy@nau.edu.ua

Показана необходимость измерения плотности авиационных топлив. Приведен краткий обзор существующих плотномеров. Рассмотрены принципы действия и конструкции датчиков измерителей плотности жидкости. Предложено устройство для измерения плотности авиационного топлива, построенное на гидростатическом принципе. Рассмотрена конструкция дифманометра с емкостным датчиком микроперемещений. Предложены модернизация существующих топливоизмерительных систем с применением рассмотренного измерителя плотности авиационных топлив.

Ключевые слова: топливоизмерительная система, плотномер, гидростатический метод, дифманометр, емкостной преобразователь.

Введение. Современное состояние авиационной техники, внедрение вычислительных средств в авиационное оборудование, а также повышенные требования к экономичности выполнения рейсов требуют пересмотра структуры авиационного оборудования и повышения качества наиболее важных параметров авиационных систем. Это, в первую очередь, относится к топливоизмерительным системам (ТИС). В документах ИКАО имеются рекомендации по дальнейшему совершенствованию ТИС современных и перспективных самолетов. Краткий анализ опыта эксплуатации ТИС показывает, что уровень надежности, погрешности, затраты на техническое обслуживание требуют дальнейшего улучшения.

В настоящее время для измерения количества топлива на борту воздушного судна (ВС) в основном применяются технические средства, основанные на измерении уровня топлива в баках. Для определения массового количества (запаса) топлива необходимо иметь информацию о плотности топлива, заправленного в бак ВС, так как массовое количество топлива вычисляется по объёму топлива, измеренному в каждом баке, и плотности топлива. Ввиду того, что на большинстве ВС плотность топлива не измеряется, то известное принятое значение плотности конкретного типа топлива (керосина Т-1, ТС-1, Т-6 и др.) вводится задатчиком плотности вручную на пульте бортинженера [1].

Зависимость объема топлива от его уровня в баке нелинейная. Это обусловлено переменной площадью сечения бака. Устранение нелинейности в емкостных топливомерах достигается профилированием емкостных датчиков уровня. С внедрением цифровой техники в оборудование современных самолетов находит применение цифровая обработка исходной информации.

Фирма «Хонейвелл» разработала современную цифровую систему измерения количества топлива (FQIS), которая используется в настоящее время на самолёте Боинг 767. Измерение количества топлива выполняется емкостным топливомером, в котором используются вертикально ориентируемые цилиндрические емкостные датчики. Одной из существенных преимуществ системы FQIS является введение в систему устройства измерения плотности авиатоплива. Это позволяет системе быть толерантной к изменениям в составе топлива без снижения точности измерений. Система FQIS имеет также способность выдерживать точность при высоких уровнях загрязнения топлива. Массовое количество топлива в системе FQIS вычисляется по объёму топлива, измеренному в каждом баке, и плотности топлива, измеренному в баке посредством плотномера. Спроектированная система основана на цифровой технике обработки данных. Система имеет двоянные каналы цифровой обработки данных в центральном процессоре, цифровой дисплей (указатель) количества топлива на приборной доске, непрерывное измерение плотности топлива в каждом баке как в полете, так и на земле.

Опыт эксплуатации системы FQIS показывает существенное преимущество применения цифровой системы измерения количества топлива, имеющей в своем составе бортовой плотномер авиационного топлива. Очевидна необходимость разработки и

внедрения подобных систем на новых типах отечественных ВС и модернизации существующих топливоизмерительных систем.

Постановка задачи. Описанная проблема может быть решена путем разработки и создания высокоточного плотномера авиатоплива. Применение плотномеров в составе ТИС позволит получить информацию о массовом количестве авиатоплива на борту ВС. По рекомендациям ИКАО новое оборудование должно иметь минимальные затраты времени и средств на его техническое обслуживание в процессе эксплуатации. Как один из путей достижения этого требования дается рекомендация по разработке внебакового оборудования.

Таким образом, необходимо выбрать принцип действия плотномера авиатоплива и разработать конструкцию плотномера внебакового размещения.

Поиск путей решения. Анализ существующих плотномеров показывает следующее. По методу измерения плотности жидкостей плотмеры делятся на следующие основные группы: поплавковые, весовые, гидростатические, радиоизотопные, вибрационные, ультразвуковые.

Поплавковые и весовые плотмеры в авиации неприменимы ввиду наличия непрерывных вертикальных ускорений.

Радиоизотопный плотмер (Боинг 767) использует принцип ослабления гамма-частиц, излучаемых низкоинтенсивным источником (изотоп Америций 241); ослабление интенсивности излучения является функцией плотности материала при прохождении частиц через него. Количество гамма-частиц, достигающих каждой из двух трубок детектора плотномера, подсчитываются процессором (рис. 1). Прохождение гамма-частиц через различные расстояния в топливе до каждой трубки детектора позволяет вычислить плотность по отношению количества частиц, достигающих каждой трубки. Этот радиометрический подход, использующий сдвоенный детектор, упрощает конструкцию плотномера и повышает точность измерения плотности путем исключения таких факторов, как начальная интенсивность источника излучения, падение интенсивности источника излучения; изменение напряжения питания трубок детектора; влияние температуры на трубки детектора и электронику.

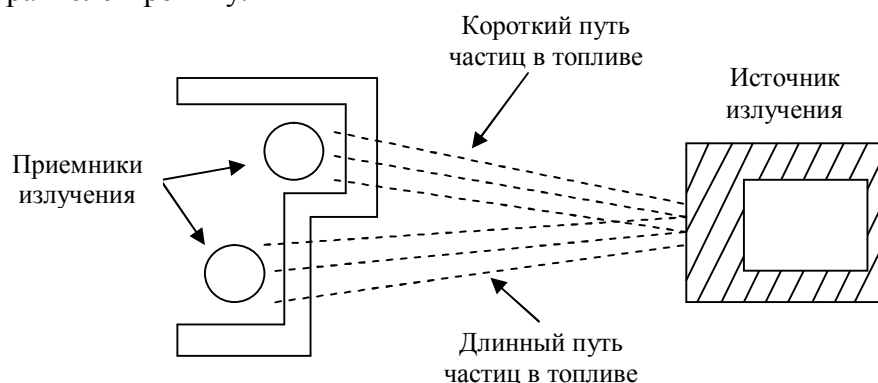


Рис. 1. Принцип действия радиометрического плотномера

Плотность зависит от сорта и температуры топлива. Температурная зависимость плотности топлива определяется как

$$\rho = \rho_0(1 - \beta T),$$

где ρ_0 – плотность топлива при температуре 20 °С; β – температурный коэффициент топлива; T – температура топлива, °С. Для устранения методической погрешности, связанной со сменой топлива и температурой окружающей среды, при измерении запаса топлива в единицах массы необходимо применять различные методы, учитывающие эти факторы. Радиометрический плотномер не может быть применен для решения поставленной задачи. Для его применения требуется внутрибаковое размещение.

Принцип действия *ультразвукового плотномера* основан на зависимости скорости звука c в среде от её плотности: $c = \frac{1}{\sqrt{\beta\rho}}$,

где β – коэффициент адиабатической сжимаемости жидкости.

Однако ультразвуковой плотномер также относится к внутрибаковому оборудованию.

Вибрационный измеритель плотности жидкостей. Датчик вибрационного плотномера представляет собой полый цилиндр (или пластина, камертон), который размещается между электромагнитной катушкой и индукционным датчиком деформации цилиндра. Сигнал с индукционного датчика поступает на вход усилителя. Выходной сигнал усилителя поступает на электромагнитную катушку. Цепь «катушка – цилиндр – датчик» является положительной обратной связью усилителя, благодаря которой возбуждаются собственные (резонансные) колебания корпуса цилиндра. Резонансная частота колебаний тела в веществе зависит от плотности вещества; чем частота меньше, тем больше плотность контролируемого вещества.

Вибрационный измеритель плотности жидкостей ВИП–2МР – бюджетная альтернатива плотномерам зарубежных производителей. Его работа также основана на измерении периода колебаний полый трубки оригинальной конфигурации, заполненной исследуемой жидкостью, и последующего вычисления значения её плотности с использованием результатов предварительной калибровки по двум веществам известной плотности, например воздуху и воде. В приборах осуществляется автоматическое преобразование полученных результатов в связанные с плотностью показатели. Вибрационный плотномер может быть размещен вне топливного бака, для этого необходимо обеспечить подвод и слив топлива, плотность которого контролируется.

Разработка конструкции бортового плотномера авиатоплива. Для решения задачи предлагается применить *гидростатический плотномер*. В гидростатических плотномерах используют линейную зависимость давления столба жидкости фиксированного размера от плотности контролируемой жидкости. Давление столба жидкости измеряют непосредственно, например мембранным манометром, или косвенно – путем продувания через жидкость воздуха, давление которого пропорционально столбу жидкости. Чтобы исключить влияние колебаний температуры и уровня жидкости, часто применяют дифференцированный метод: измеряют разность давлений дифманометром.

Обзор и анализ технической литературы и патентной документации показывает, что для решения рассмотренных выше проблем наиболее приемлемым является дифманометр, рассмотренный в работе [2]. Данная конструкция использована при разработке бортового плотномера авиационного топлива внебакового размещения (рис. 2). Корпус дифманометра 2 закреплен на основании 1, которое размещено на нижней части бака 6. Через трубопроводы 3 с кранами 4 гидростатическое давление верхнего и нижнего уровней подается в верхний и нижний манометрические узлы. На плоскости основания размещен металлический корпус электронного блока.

Принцип действия дифманометра основан на соединении двух манометрических узлов, имеющих общий подвижный узел. Его перемещение преобразуется в электрический сигнал с помощью дифференциального емкостного датчика, величина емкости которого измеряется трансформаторным мостом.

Существенные особенности устройства:

- чувствительным элементом является мембранный узел, выполненный цельнометаллическим с корпусом, что позволяет исключить погрешности и эксплуатационные сложности, связанные с заземлением (закреплением) мембран, а также повысить температурную стабильность устройства;

- рабочий прогиб чувствительного элемента предусматривается не более 0,1 мм, что позволяет получить достаточно высокую линейность;

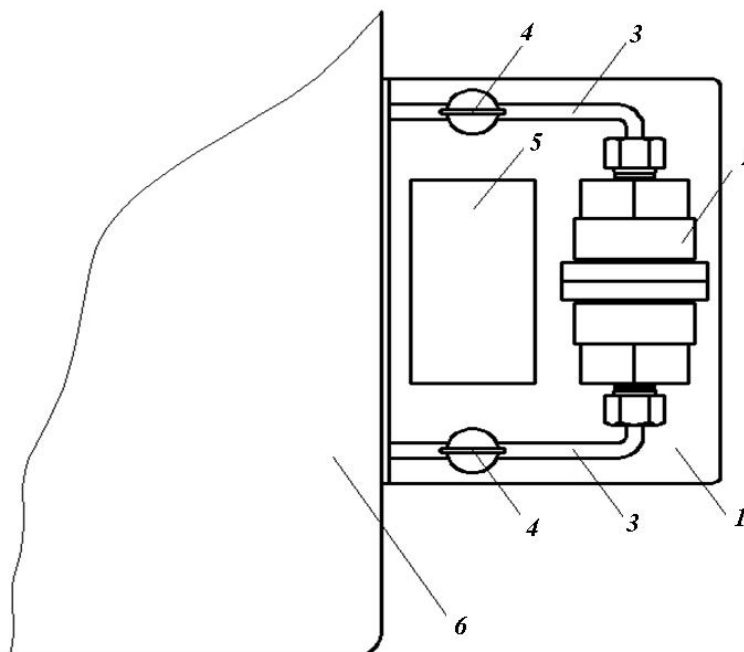


Рис. 2. Конструкция плотномера внебакового размещения: 1 – основание; 2 – дифманометр; 3 – трубопровод; 4 – шаровой кран; 5 – электронный блок; 6 – топливный бак

– в устройстве применен электроемкостный дифференциальный преобразователь с односторонним съемом полезной информации, что позволяет избежать конструктивных сложностей обеспечения контакта с подвижной частью датчика;

– применение трансформаторного моста позволяет резко снизить погрешности измерения.



Рис. 3. Внешний вид опытного образца дифманометра

Особенности конструкции дифманометра, преимущества ее параметров в сравнении с известными, специфика изготовления основных деталей конструкции, методика сборки подробно изложены в работе [2]. Для проведения экспериментальных исследований изготовлен опытный образец (рис. 3).

Для повышения чувствительности и точности гидростатического измерителя плотности авиационного топлива предлагается применить сильфонные манометрические узлы (рис. 4).

Разработка измерительной схемы. Как показали экспериментальные исследования, величина информационной емкости преобразователя дифманометра достаточно мала и составляет $10^{-3} \dots 10^{-4}$ пФ. Чтобы получить достаточную точность таких измерений, необходимо применить измерительное устройство с чувствительностью не меньше 10^{-6} пФ.

Обзор и анализ измерительных устройств [3 – 5] показывает, что наиболее приемлемыми являются трансформаторные измерительные мосты. Основными отличительными особенностями таких мостовых измерительных цепей являются высокая стабильность, хорошая устойчивость от влияния внешних электромагнитных помех и внутренних паразитных электрических и магнитных связей, широкий частотный диапазон, а также исключительная гибкость, обеспечивающая различные измерительные режимы и широкие возможности при решении многообразных функциональных задач.

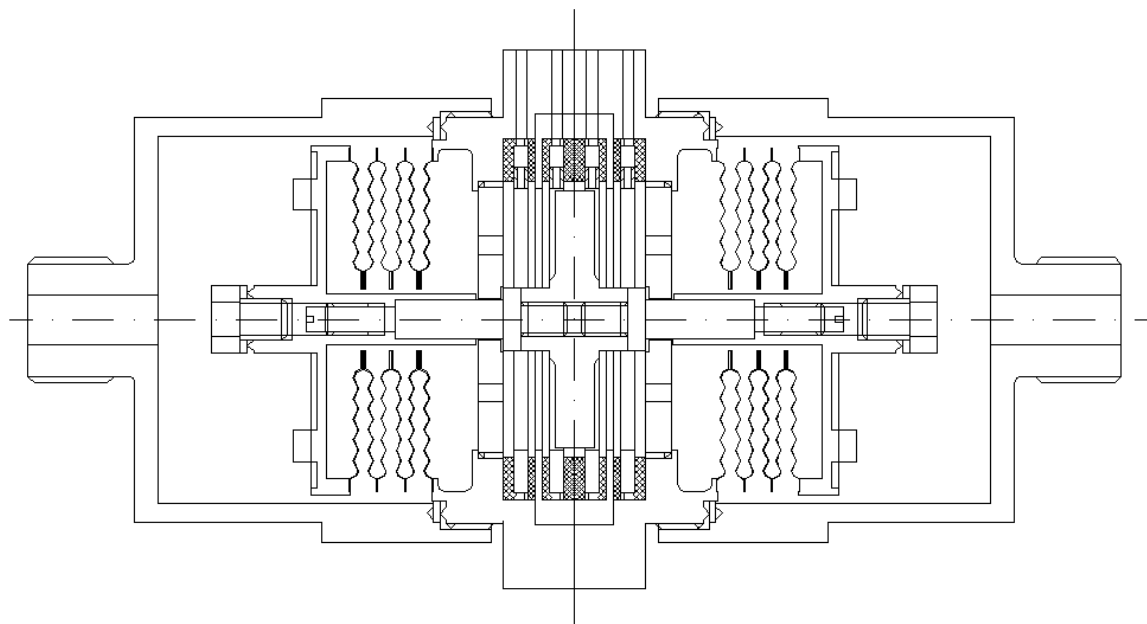


Рис. 4. Дифманометр с сильфонными манометрическими узлами

Экспериментальные исследования, выполненные в процессе разработки различных емкостных преобразователей, показали вполне реальную достижимость таких результатов. С целью повышения точности измерений применяется метод волновых мультифилярных обмоток с тесной электромагнитной связью, обеспечивающих погрешности не более 0,001 %. Одним из основных достоинств трансформаторных плечевых элементов с тесной связью является исключительная устойчивость их плечевых отношений при действии паразитных проводимостей, шунтирующих эти элементы. Существенным преимуществом индуктивно связанных плечевых элементов является также высокая температурная и временная стабильность отношений плеч.

Для измерения плотности авиационных топлив разработана измерительная схема, построенная на основе трансформаторного моста с цифровым уравниванием (рис. 5). Схема функционирует следующим образом.

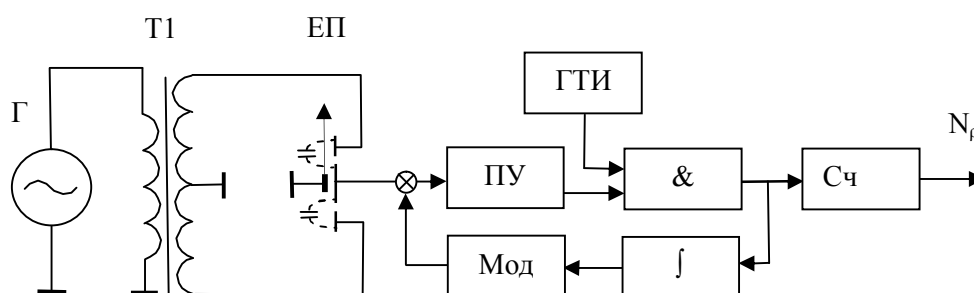


Рис. 5. Измерительная схема плотномера с цифровым уравниванием

Напряжение питания плечевого трансформатора Т1 подается с генератора Г. С плечевых обмоток плечевого трансформатора противофазные напряжения подаются на высокопотенциальные электроды емкостного преобразователя ЕП с неоднородным полем. В плотномере применен электроемкостный дифференциальный преобразователь с односторонним съемом полезной информации. Заземленная подвижная часть датчика при изменении разности давлений смещается, изменяя емкости между низкопотенциальным и высокопотенциальными электродами ЕП. Сигнал разбаланса моста с низкопотенциального электрода поступает на вход предварительного усилителя ПУ с высокоомным входом. Генератор тактовых импульсов ГТИ подает сигнал на один из входов логического элемента

И-НЕ (&). Сигнал с выхода усилителя ПУ дает разрешение на проход импульсов ГТИ на счетчик Сч. Значение цифрового кода N_p плавно нарастает. Импульсный сигнал поступает на вход интегратора $\int$, с выхода интегратора нарастающий сигнал поступает на модулятор Мод. Опорное напряжение на модулятор подается с генератора Г с отдельной обмотки (на рисунке не указано). Сигнал модулятора подается на вход усилителя в противофазе с сигналом разбаланса моста. При достижении равенства сигналов выходной сигнал станет равным нулю. Логический элемент И-НЕ закроет подачу импульсов с ГТИ. Полученное значение кода N_p несет информацию об измеренном значении плотности.

Выводы. Конструкция предлагаемого плотномера внебакового размещения позволит существенно снизить затраты на обслуживание оборудования. Конструкция дифманометра, входящего в состав гидростатического плотномера, обеспечивает требуемую точность измерений. Работоспособность устройства проверена экспериментально.

Разработанная измерительная схема легко реализуется существующими компонентами, что позволит наладить производственный процесс изготовления плотномеров авиационных топлив. Точность измерений, которая может быть достигнута предлагаемой измерительной схемой, дает возможность осуществлять непрерывный контроль качества авиационного топлива при заправке и в процессе полета. Измеренные значения плотности авиационного топлива выдаются электрическим сигналом в цифровом виде (двоичный код), что позволяет обрабатывать информацию программно на БЦВМ.

Список литературы

1. *Справочник авиационного инженера.* – М.: Транспорт, 1978. – 400 с.
2. *Козлов А. П.* Об'ємометрична паливовимірювальна система повітряного корабля / А. П. Козлов, В. О. Хаданович / Електроніка та системи управління. – 2010. – Вип. 4 (26). – С. 5–11.
3. *Трансформаторные измерительные мосты* / под общ. ред. чл.-кор. АН СССР К. Б. Карандеева. – М.: Энергия, 1970. – 280 с.
4. *Гриневиц Ф. Б.* Измерительные компенсационно-мостовые устройства с ёмкостными датчиками / Ф. Б. Гриневиц, А. И. Новик. – К.: Наук. думка, 1987. – 112 с.
5. *Бугров А. В.* Высокочастотные емкостные преобразователи и приборы контроля качества / А. В. Бугров – М.: Машиностроение, 1982, – 96 с.

А. П. Козлов

Бортовой плотномер авіаційного палива

Показана необхідність вимірювання густини авіаційних палив. Наведено короткий огляд існуючих вимірників густини рідких речовин, Розглянуто принципи дії та конструкції датчиків вимірників густини рідини. Пропоновано пристрій для вимірювання густини авіаційного палива, побудованого на гідростатичному принципі. Розглянуто конструкцію дифманометра з ємнісним датчиком мікропереміщень. Пропоновано модернізацію існуючих паливовимірювальних систем із застосуванням розглянутого вимірника густини авіаційних палив.

A. P. Kozlov

The onboard meter of density of jet fuel

The need to measure density of jet fuel is shown. Overview of the existing meter of density is considered. The principles of operation and constructions of the liquid density meter sensors considered. A device for measuring the density of jet fuel, built on the hydrostatic principle, is proposed. The construction of meter pressure switch with a capacitive sensor micromovings considered. It is proposed modernization of existing systems using fuel meter system with application of fuel density meter.