

Лекция № 6

Тема 2. Приборы и системы контроля работы авиадвигателей

Авиационные топливомеры и расходомеры

- 2.16. Электромеханические поплавковые топливомеры типа СБЭС
- 2.17. Електроемкостные топливомеры типа АЦТ, СПУТ, СУИТ
- 2.18. Сигнализаторы уровня топлива на магнитоуправляемых контактах
- 2.19. Виды расхода топлива
- 2.20. Турбинный расходомер топлива типа СИРТ с датчиком ДРТМС
- 2.21. Методы компенсации температурных погрешностей
- 2.22. Расходомер топлива с ведущей крыльчаткой

Измерительный комплекс топливной и масляной систем воздушных судов

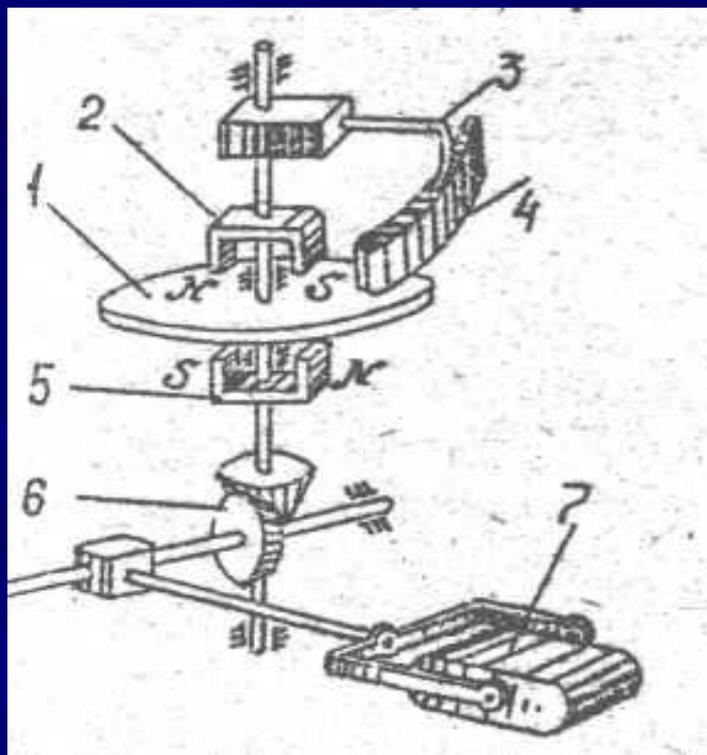
Масса топлива составляет примерно 30...60% взлетной массы современного ВС, поэтому большое значение имеет результат измерения запаса и расхода топлива. Точное определение количества топлива необходимо по соображениям безопасности полета, способствует увеличению его дальности и продолжительности.

Основные методы измерения запаса жидкости в авиации, основанные на измерении его уровня:

- **поплавковый**, основанный на определении уровня с помощью поплавка, плавающего на поверхности жидкости в баке.
- **электроемкостной**, который реализует зависимость электрической емкости преобразователя конденсатора от уровня жидкости в баке.

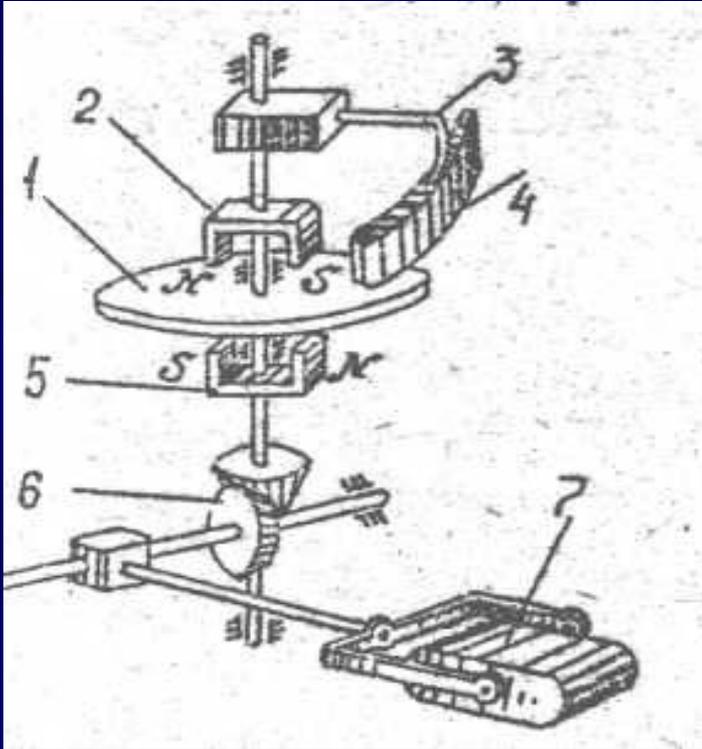
2.16. Электромеханические поплавковые топливомеры типа СБЭС

Применяются следующие типы электромеханических поплавковых топливомеров (масломеров): **БЭС**, **КЭС**, **МЭС**, **СБЭС** и т.д. Буквы в обозначении типа определяют вид измеряемой жидкости и особенности конструкции: Б - бензин, К - керосин, М - масло. Буква С в начале обозначения указывает, что топливомер суммирующий, в конце " что имеется сигнализация критического остатка топлива или масла.



Принцип действия поплавковых топливомеров (масломеров) основан на преобразовании неэлектрической величины - переменной высоты уровня жидкости в электрическую - переменное активное сопротивление, меняющееся в соответствии с изменением уровня жидкости.

2.16. Электромеханические поплавковые топливомеры типа СБЭС



Датчик электрического поплавково - рычажного топливомера:
 1 - немагнитная стрелка;
 2,5 - магниты; 3 - щетка потенциометра; 4 - потенциометр;
 6 – конические зубчатые колеса;
 7 – поплавок

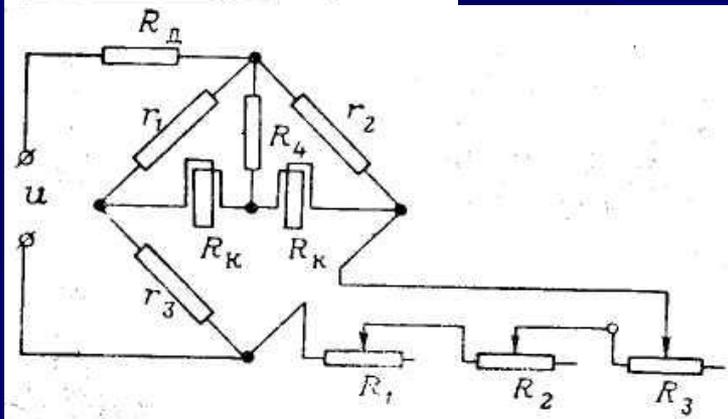
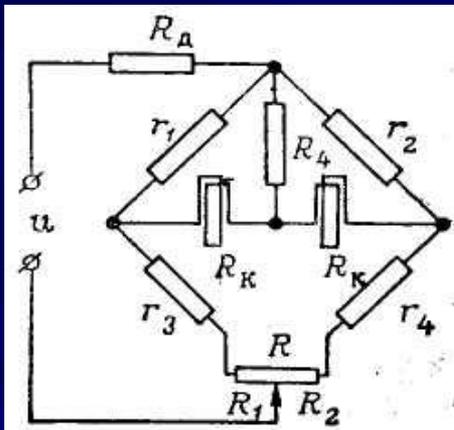
При изменении уровня топлива (масла) в баке поплавков, находящийся на поверхности, следует за изменением уровня и через систему рычагов в конечном итоге перемещает ползунок потенциометра, расположенного в корпусе датчика.

Для обеспечения герметичности передачи перемещения через стенку бака применена магнитная муфта.

Измерение сигнала датчика поплавкового топливомера (масломера) может быть осуществлено либо непосредственно магнитоэлектрическим логометром, либо компенсационным способом (последний используется в топливомерах типа ТПР).

Равномерный характер шкалы топливомера можно получить, изменяя форму полюсных наконечников или сердечников логометра.

2.16. Электромеханические поплавковые топливомеры типа СБЭС

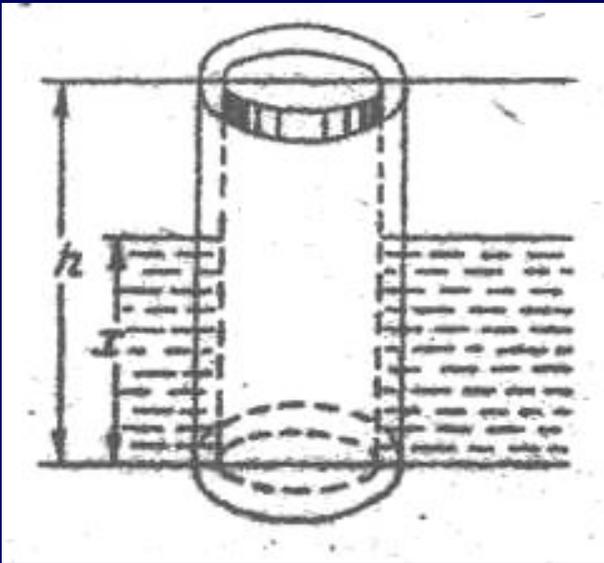


При измерении суммарного количества топлива в нескольких баках применяется схема последовательного соединения датчиков. В этом случае, когда к одному указателю с заданной характеристикой шкалы подключаются разные датчики, устанавливаемые в баках различной формы, подгонка указателя к датчику производится путем профилирования реостата датчика и подключения добавочных сопротивлений. Профилирование реостатов датчиков позволяет сохранить равномерность шкалы указателя для всех баков.

Существенными недостатками поплавковых измерителей являются *наличие подвижных частей в датчике (в баке), громоздкость датчиков в случае больших баков и трудности их использования в баках сложной формы.* Вследствие этого на современных ЛА широко применяются *электроёмкостные топливомеры, которые не имеют первого из указанных недостатков, а второй и третий присущи им в значительно меньшей мере.*

2.17. Электроемкостные топливомеры типа АЦТ, СПУТ, СУИТ

Принцип действия емкостного топливомера основан на измерении емкости специального конденсатора, функционально связанной с уровнем, а следовательно, с объемом и массой топлива в баке.

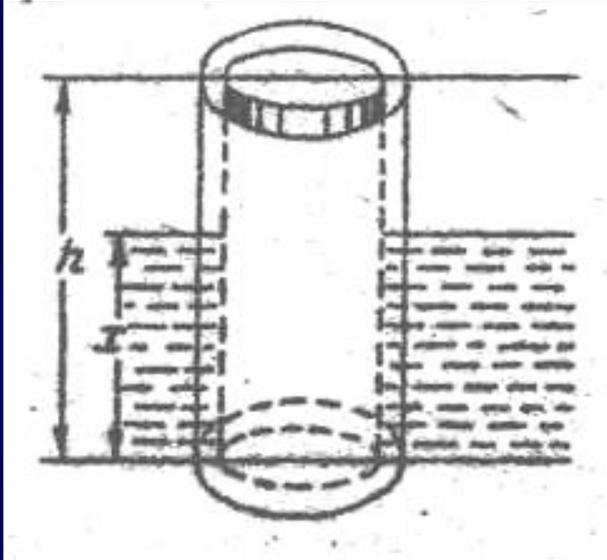


Определение зависимости емкости датчика от уровня топлива.

$$C_1 = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_1}{\ln \frac{d_2}{d_1}} x \quad C_2 = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_2}{\ln \frac{d_2}{d_1}} (h - x)$$

$$C = C_1 + C_2 = \frac{2\pi\varepsilon_0 (h\varepsilon_2 + x(\varepsilon_1 + \varepsilon_2))}{\ln \frac{d_2}{d_1}}$$

2.17. Электроемкостные топливомеры типа АЦТ, СПУТ, СУИТ



$$C = C_1 + C_2 = \frac{2\pi\epsilon_0(h\epsilon_2 + x(\epsilon_1 + \epsilon_2))}{\ln \frac{d_2}{d_1}}$$

$$C = C_0 + C_x$$

$C_0 = k_\delta h\epsilon_2$ - емкость “сухого” датчика (при $x = 0$),

$C_x = k_\delta x(\epsilon_1 - \epsilon_2)$ - составляющая емкости, пропорциональная уровню топлива

$$k_\delta = 2\pi\epsilon_0 / \ln \frac{d_2}{d_1}$$

Емкость C является линейной функцией, так что измерение уровня можно свести к измерению емкости датчика (ϵ_1 и ϵ_2 пока полагаем постоянными).

2.17. Электроемкостные топливомеры типа АЦТ, СПУТ, СУИТ

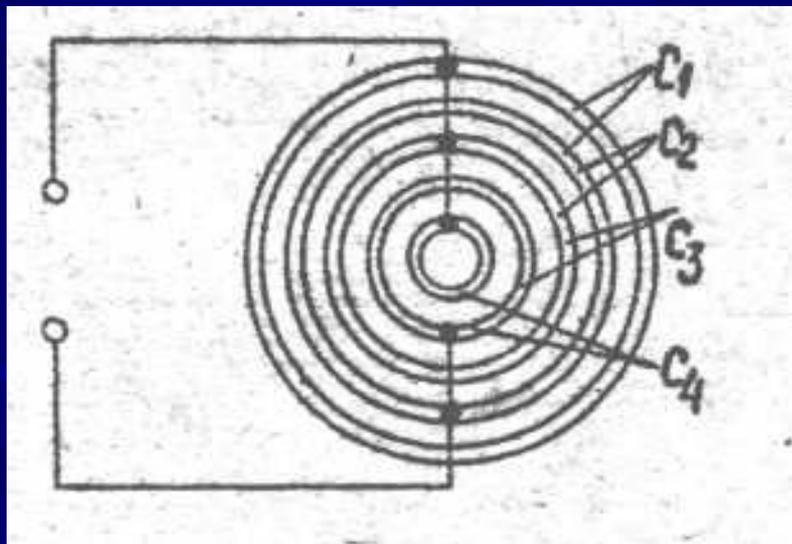
26

Чувствительность датчика

$$\frac{dC}{dx} = k_d (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$$

$$k_d = 2\pi\varepsilon_0 / \ln \frac{d_2}{d_1}$$

Для повышения чувствительности желательно увеличивать значение k_d путем уменьшения зазора $\Delta = \frac{d_2 - d_1}{2}$, но этот способ ограничен из-за возрастания вероятности замыкания электродов (труб).

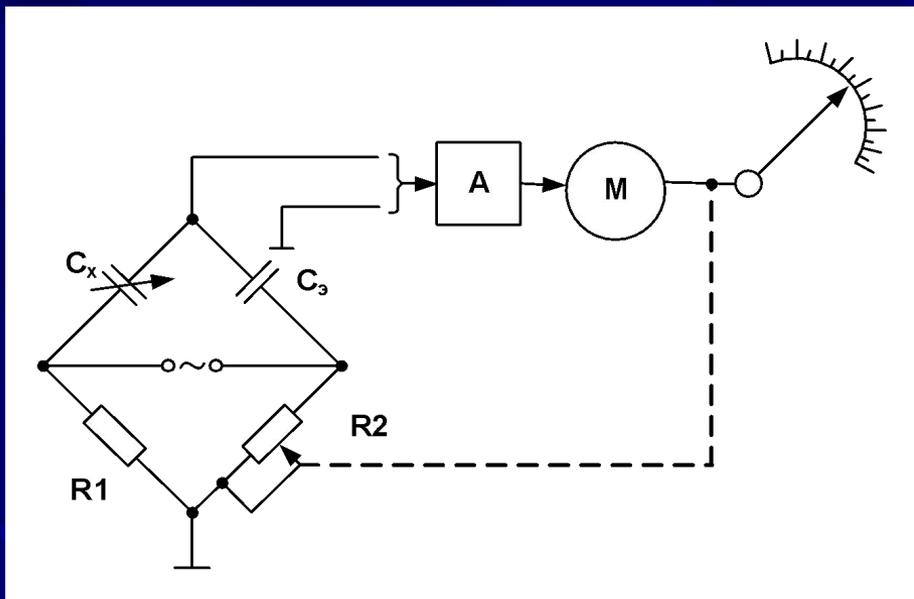


Обычно зазор ограничивается величиной $1,56 \cdot 10^{-3}$ м, а датчики для большей чувствительности собирают из нескольких коаксиальных труб (до шести), которые через одну соединяются друг с другом, образуя параллельно соединенные конденсаторы

2.17. Электроемкостные топливомеры типа АЦТ, СПУТ, СУИТ

Измерение емкости датчика в СПУТ

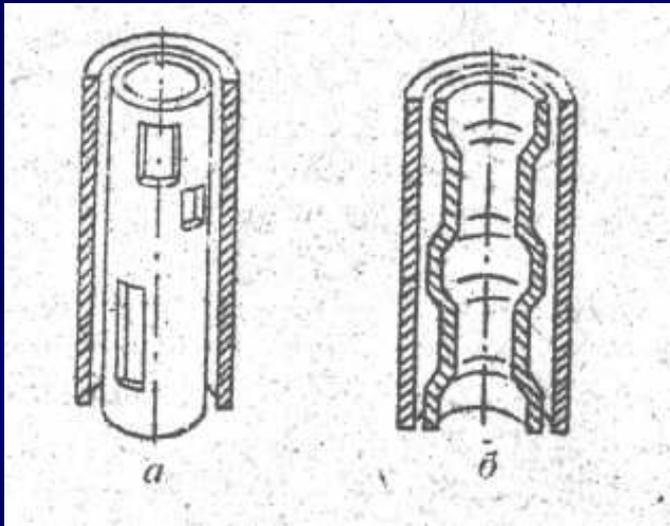
Осуществляется с помощью самоуравновешивающихся мостов переменного тока по типовой схеме



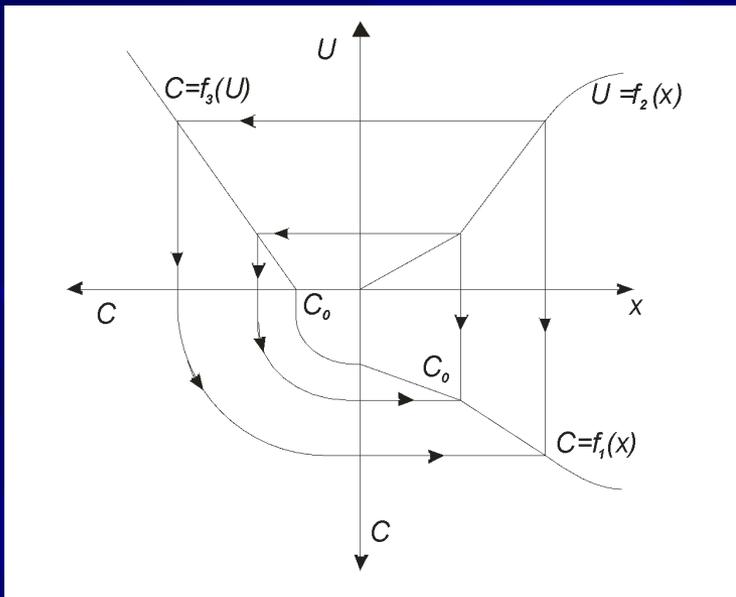
Перемещение стрелки пропорционально изменениям емкости C_x датчика и, следовательно, уровню топлива. Поэтому, как при объемной, так и при массовой градуировке, шкала прибора будет равномерной лишь тогда, когда площадь поперечного сечения бака постоянна по его высоте.

В противном случае для получения равномерной шкалы надо обеспечить не постоянство $\frac{dC}{dx}$, а условие $\frac{dC}{dv} = \text{const}$, где v - объем топлива в баке.

Емкостные топливомеры типа СПУТ



Для этого емкостные датчики профилируют за счет изменения производной dS/dv (S - площадь поверхности труб датчика) и тем самым по высоте датчика dC/dx (например, с помощью вырезов в трубах, зависящих от формы бака). Требуемый закон профилировки определяется графически.



Искомая характеристика датчика $C = f_1(x)$ находится по заданной кривой $v = f_2(x)$, зависящей от формы бака, и требуемой линейной зависимости $C = f_3(v)$.

$$C = C_0 + kv(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$$

Электроемкостные топливомеры типа СПУТ

При массовой градуировке, используя связь между объемом v , массой m и плотностью ρ топлива,

$$v = \frac{m}{\rho}$$

будем иметь соответственно выражение

$$C = C_0 + k \frac{m}{\rho} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) = C_0 + C_m$$

В данном случае зависимость $C(\rho)$ отражает тот факт, что при неизменной массе топлива его уровень, а значит и емкость C датчика зависят от ρ .

Погрешности электроемкостных топливомеров

При выводе основных расчетных соотношений

$$C = C_0 + kv(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$$

$$C = C_0 + k \frac{m}{\rho} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) = C_0 + C_m$$

(учитывалась однозначная зависимость $x = f(v)$ между уровнем топлива в датчике и объемом топлива в баке. Кроме того, полагалось, что диэлектрическая проницаемость топлива ε и его плотность ρ являются неизменными, а профилировка датчика всегда соответствует характеристике бака.

В полете и в процессе эксплуатации указанные условия могут не выполняться.

Методические погрешности:

1. Погрешности из-за перераспределения топлива в баках при эволюциях ЛА и ускорения его центра масс (отсутствуют лишь в прямолинейном равномерном горизонтальном полете) - могут быть уменьшены установкой датчика в центре бака, что не всегда возможно по конструктивным соображениям. Используют также установку в баке в разных местах нескольких датчиков, емкости которых включают параллельно.

Погрешности электроемкостных топливомеров

$$C = C_0 + kv(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$$

$$C = C_0 + k \frac{m}{\rho} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) = C_0 + C_m$$

2. Погрешности из-за отклонения диэлектрической проницаемости топлива ε_1 и его плотности ρ от их тарировочных значений при изменениях сорта и (или) температуры топлива (из-за аэродинамического нагрева поверхности ЛА при длительных полетах со сверхзвуковыми скоростями топливные баки могут нагреваться до $80...100^0$ С). Уровень ошибок при этом зависит от градуировки топливомера (объемная или массовая) и может достигать до 5%.

3. Погрешности из-за неточного совпадения профиля датчика с характеристикой бака, возникающие из-за температурных изменений размеров датчиков и баков, из-за изменений в процессе эксплуатации зазоров между электродами датчиков и выпадения смолистых осадков из топлива на поверхности изоляторов датчика (погрешность из-за активной проводимости датчика вследствие его загрязнения лежит в пределах от 0,1 до 10%).

Методические погрешности при массовой градуировке значительно меньше, чем при объемной

Погрешности электроемкостных топливомеров

Инструментальные погрешности. Для емкостных топливомеров эти погрешности по сравнению с методическими достаточно малы, что связано с применением нулевого метода измерения, реализуемого схемой самоуравновешивающихся мостов. В результате показания топливомеров слабо зависят от величины и частоты питающего напряжения, изменений коэффициента усиления усилителя, характеристик электродвигателя и т.п.

Предельные приведенные инструментальные погрешности емкостных топливомеров на нулевых отметках шкалы измерителя обычно равны +2%, на наибольшей +34% - отношение наибольшей емкости $C_{нб}$, соответствующей предельной отметке шкалы, к начальной C_0 , соответствующей нулевой отметке, равно отношению диэлектрических проницаемостей топлива и воздуха:

$$\frac{C_{нб}}{C_0} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \approx 2,1$$

В современных топливомерах для уменьшения инструментальных погрешностей вместо датчиков пустых баков по мере выработки топлива подключаются эталонные емкости.

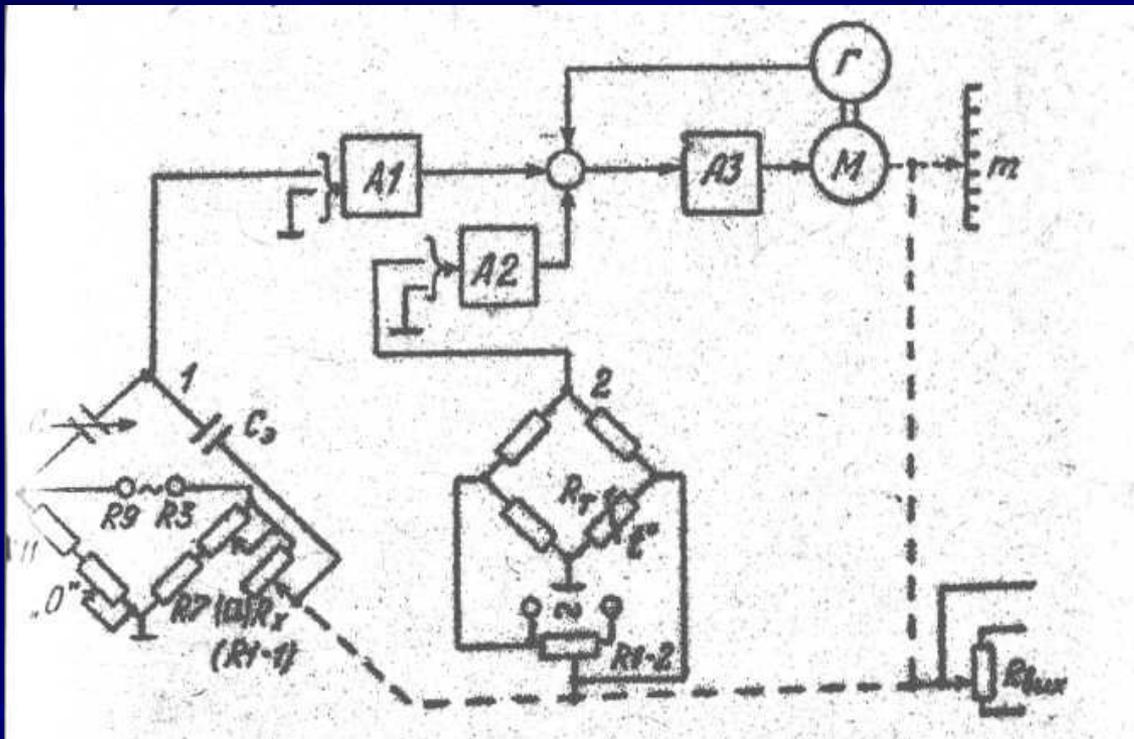
2.18. Методы компенсации температурных погрешностей

19

Измерительная схема.

Компенсация методических погрешностей из-за изменения ρ и ε_1 топлива.

$$v = \frac{m}{\rho}$$



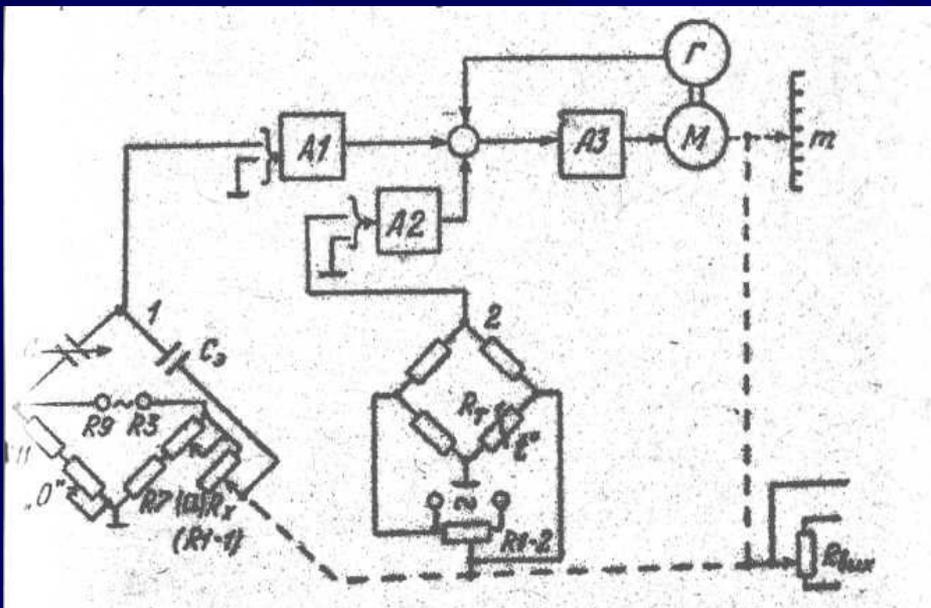
Компенсация погрешностей при замене сорта производится перенастройкой основного моста 1 изменением параметров одного из его резисторных плеч.

Регулировка топливомера при пустом баке (“регулировка нуля”) производится реостатом R9, с помощью которого добиваются нулевых показаний по указателю. После заправки бака регулировка осуществляется реостатом R3 (“регулировка максимума”) так, чтобы показания топливомера соответствовали массе заправленного топлива.

2.18. Методы компенсации температурных погрешностей

Измерительная схема.

Компенсация методических погрешностей из-за изменения ρ и ε_1 топлива.



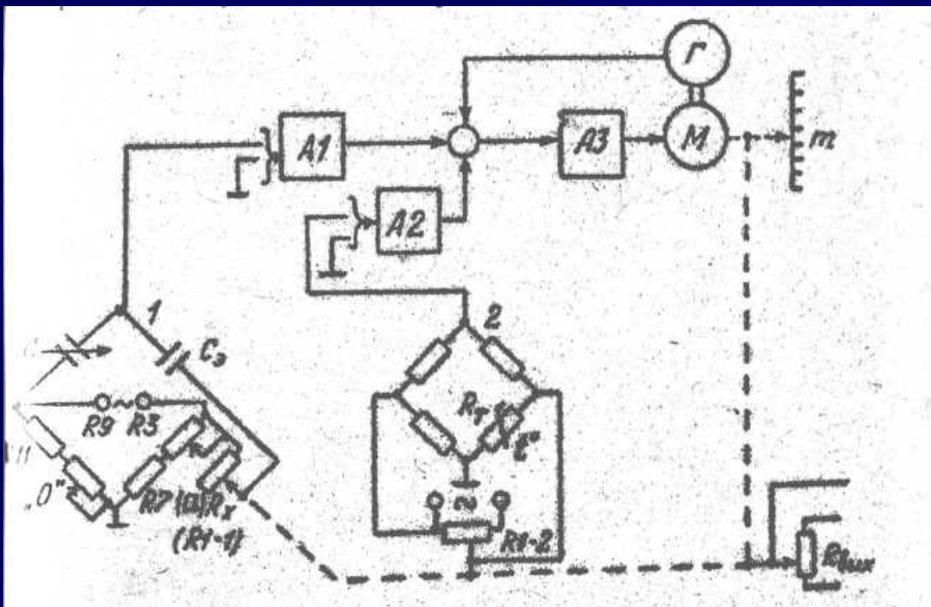
Для компенсации методической температурной погрешности служит дополнительный мост 2, одно из плеч которого составляет терморезистор R_t , встроенный в нижнюю часть емкостного датчика топливомера. Благодаря связи движка потенциометра $R1-2$ с валом двигателя M обеспечивается пропорциональность напряжения питания моста 2 массе топлива. Это необходимо для выполнения условия

$$\frac{C_{нб}}{C_0} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \approx 2,1$$

т.е. для изменения коэффициента усиления измерительной схемы по мере выработки топлива от $2,1k_0$ до k_0 (k_0 - коэффициент усиления измерительной схемы при пустых баках).

2.18. Методы компенсации температурных погрешностей

Указатели топливомера.



Современные топливомеры обычно градуируют в массовых (весовых) единицах. Инженерные расчеты количества топлива на полет производятся в единицах массы, так как именно масса, а не объем топлива определяет его теплотворную способность и тем самым дальность полета.

Указатели топливомеров относятся к приборам со стрелочной индикацией, имеющим круговую или прямоугольную (вертикальную) шкалу.

Профилировка датчиков позволяет использовать один указатель для индикации количества топлива как в отдельных баках (или группах баков), так и суммарного количества топлива. Необходимая при этом коммутация осуществляется галетным переключателем, устанавливаемым обычно под указателем.

2.19. Виды расхода топлива

Расходомерами называются системы для измерения мгновенного или суммарного (за определенный промежуток времени) расхода жидкостей и газов.

Расходомеры, основанные на непосредственном измерении скорости потока с помощью крыльчатки (вертушки), называют скоростными.

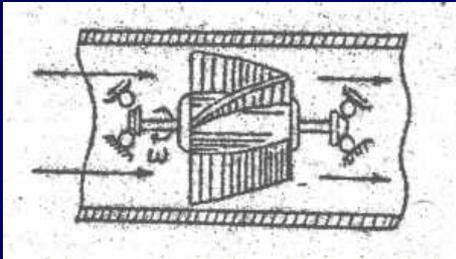
Измерение суммарного расхода достигается интегрированием данных о мгновенном расходе.

Использование расходомеров для измерения мгновенного расхода топлива наиболее характерно для ЛА с несколькими двигателями, где необходимо поддерживать их работу на одинаковых режимах (мощность двигателя пропорциональна мгновенному массовому расходу топлива).

Суммирующие расходомеры состоят собственно из датчика расходомера, установленного в магистрали подачи топлива в двигатель и измеряющего расход в единицу времени, и интегрирующего устройства, обеспечивающего суммирование. Суммирующие расходомеры в большинстве случаев показывают не израсходованное, а остающееся количество топлива (для этого необходима также информация о начальных условиях, т.е. о запасе топлива перед полетом).

2.20. Турбинный расходомер топлива типа СИРТ с датчиком ДРТМС

Принцип действия таких расходомеров основан на использовании зависимости скорости вращения ω крыльчатки, помещенной в поток жидкости, от скорости потока V , а следовательно, от мгновенного расхода



$$\omega = k_k V$$

Мгновенный объемный расход $Q = SV$

$$\omega = \frac{k_k}{S} Q = k Q$$

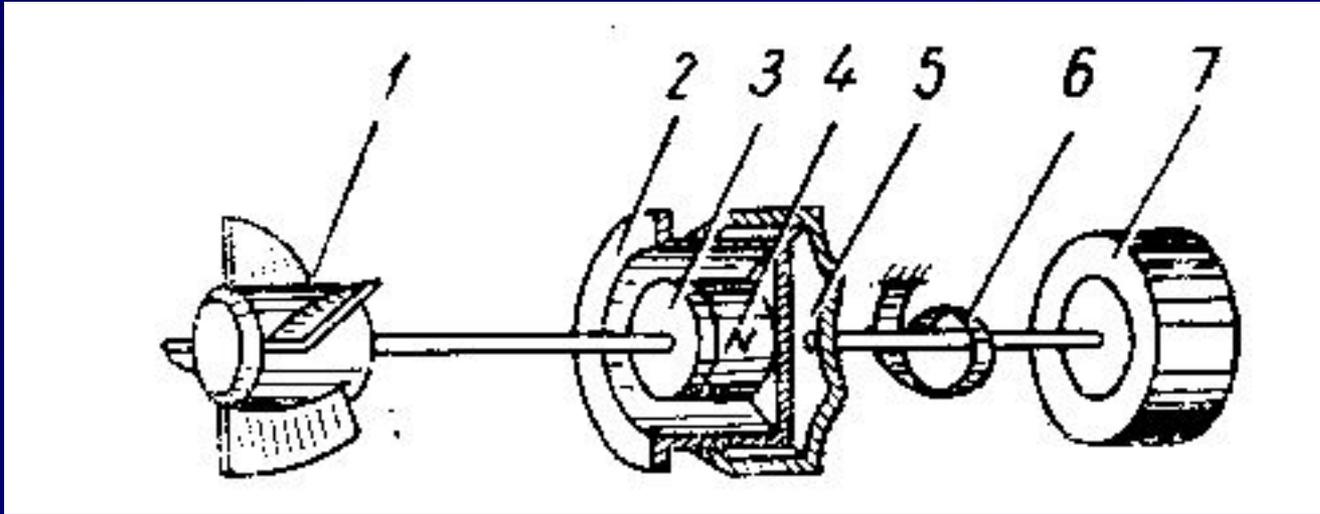
Мгновенный массовый расход $\dot{m} = \rho Q = \rho SV$

$$\omega = \frac{k}{\rho} \dot{m}$$

Таким образом, измерение мгновенного расхода сводится к измерению скорости вращения крыльчатки.

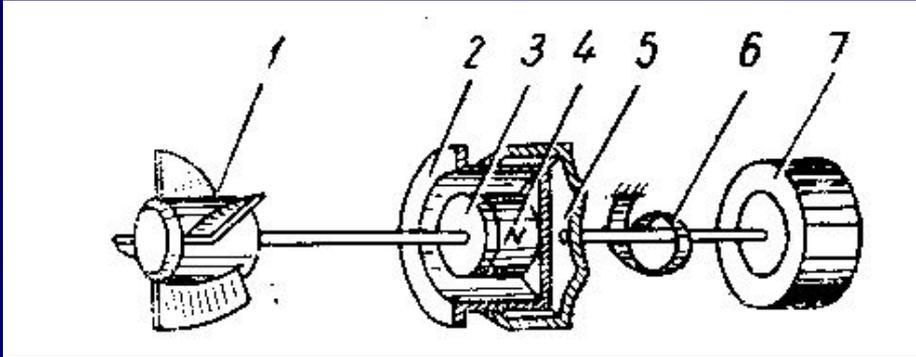
2.20. Турбинный расходомер топлива типа СИРТ с датчиком ДРТМС

Измерение ω осуществляется с помощью измерительных узлов, подобных применяемым в магнитоиндукционных тахометрах.



1 крыльчатка; 2 диамагнитный кожух; 3 термомагнитный шунт; 4 постоянный магнит; 5 стакан (чувствительный элемент); 6 пружина; 7 сельсин датчик

2.20. Турбинный расходомер топлива типа СИРТ с датчиком ДРТМС



Крыльчатка 1 приводит во вращение постоянный магнит 4 с термомагнитным шунтом 3. Герметичность датчика обеспечивается диамагнитным кожухом 2. Вращение магнита приводит к повороту стакана 5 из-за взаимодействия полей магнита и вихревых токов в стакане. Соответственно поворачивается связанный осью со стаканом ротор сельсина датчика 7. Угол поворота, ограничиваемый пружиной 6, будет пропорционален мгновенному объемному расходу топлива. Передача этого угла на указатель осуществляется сельсинной системой, работающей в индикаторном режиме.

2.21. Методы компенсации температурных погрешностей

Методические погрешности. При объемной градуировке методических погрешностей нет. Однако расходомеры мгновенного расхода градуируются в массовых единицах. В этом случае, если в схеме расходомера нет измерителя плотности ρ топлива, методические погрешности будут возникать при отклонениях ρ от тарировочного значения ρ^* вследствие изменений температуры и сорта топлива. Значение ρ^* обычно указывается на шкале указателя.

Погрешности из-за замены сорта топлива могут достигать $\pm 4-5\%$, а температурные $\pm 8-10\%$ (при $T = \pm 80^\circ \text{C}$)

Инструментальные погрешности. Эти погрешности складываются из погрешностей гидравлического тракта (датчиков) и измерительной схемы, причем основное значение имеют первые.

2.21. Методы компенсации температурных погрешностей

Инструментальные погрешности.

Погрешности гидравлического тракта (датчиков).

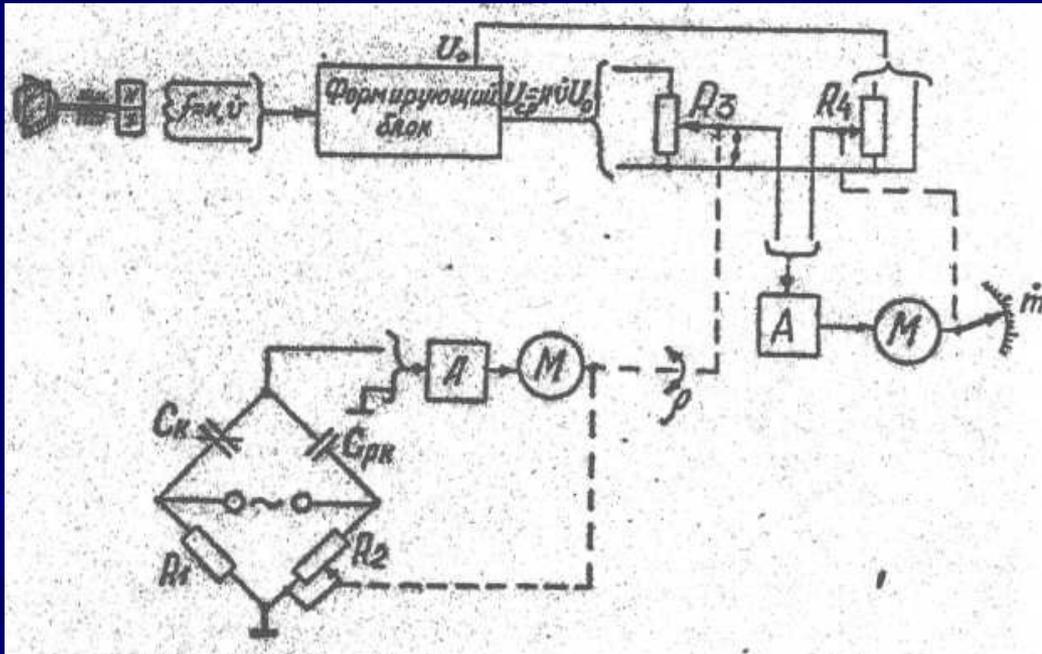
Вызывается моментом сопротивления M_c вращению крыльчатки, который приводит к закручиванию жидкости в направлении, противоположном направлению вращения крыльчатки. В результате ω^* будет меньше расчетного значения на величину угловой скорости ω_z закручиваемой жидкости.

Для уменьшения этой погрешности необходимо, чтобы течение топлива в области установки крыльчатки не было турбулентным. В целях достижения этого и для направления потока вдоль оси крыльчатки перед крыльчаткой и после крыльчатки устанавливаются струена - управляющие аппараты, прямые лопатки которых расположены параллельно оси турбинки.

Согласно экспериментальным данным, приведенные относительные погрешности из-за гидравлических потерь, достигают 3%.

Особенности устройства расходомеров мгновенного расхода

Для повышения точности измерения мгновенного массового расхода в измерительную схему расходомера помимо основного чувствительного элемента “крыльчатки” включают также измеритель плотности, которым может служить емкостной датчик (плотномер), полностью погруженный в топливо.

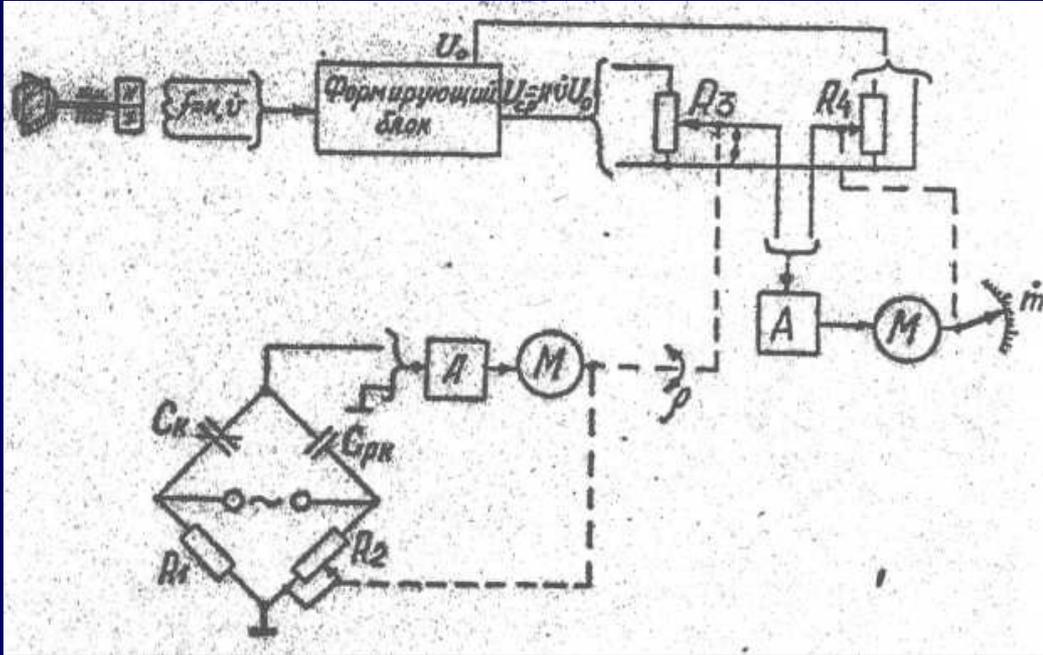


Такая усовершенствованная схема реализована в канале мгновенного расхода комбинированных расходомеров мгновенного и суммарного расхода топлива серии РТМСВ.

Расходомер мгновенного расхода состоит из схем измерения объемного расхода  и плотности ρ ,

а также схемы умножения полученных величин ( и ρ) и отработки результирующего сигнала.

Особенности устройства расходомеров мгновенного расхода



Плотность ρ измеряется мостовой самобалансирующейся схемой, одним из элементов которой является компенсационный датчик C_k (емкостной плотномер). Выходным сигналом схемы служит перемещение щетки потенциометра $R3$, пропорциональное ρ .

Первая схема включает крыльчатку и канал тахометра, в состав которого входят датчик сигналов частоты $f = k \nu$ (синхронный генератор) и формирующий блок. Среднее напряжение U_{cp} выхода этого блока (постоянного тока) пропорционально мгновенному объемному расходу ν .

Величины ρ и ν перемножаются на потенциометре $R3$

Выходной сигнал $R3$ (потенциал его щетки), пропорционален массовому мгновенному расходу m .

2.22. Расходомер топлива с ведущей крыльчаткой

Принцип действия скоростных суммирующих расходомеров.

Измерение суммарного расхода (в объемных Q или массовых Q_m единицах) сводится к интегрированию во времени соответствующих данных о мгновенном расходе:

$$Q_v = \int_0^t v d\tau \quad Q_m = \int_0^t \dot{m} d\tau$$

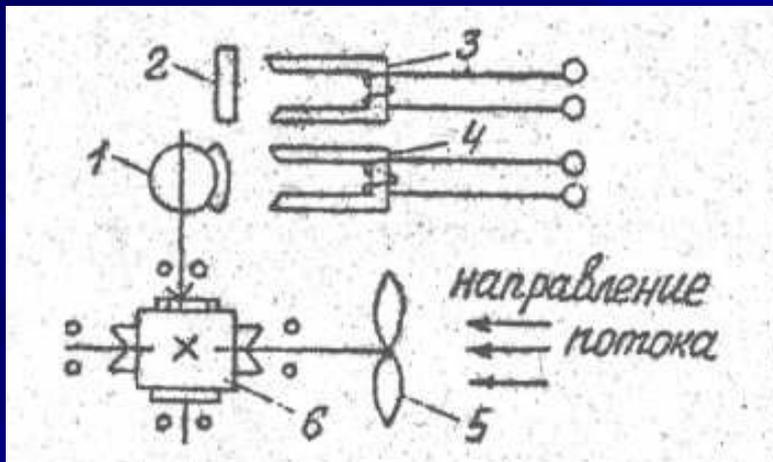
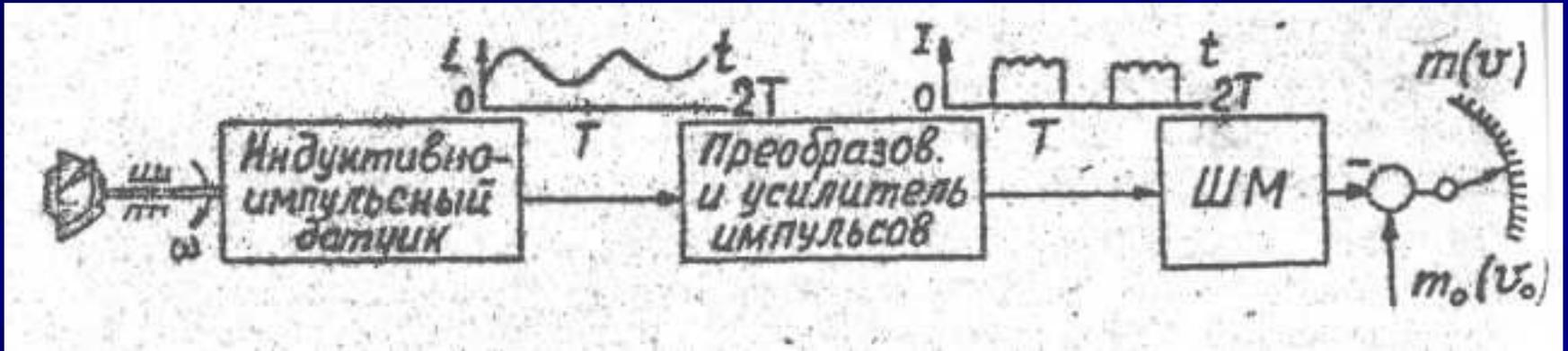
Для скоростного метода

$$Q_v = k \int_0^t \omega d\tau \quad Q_m = k\rho \int_0^t \omega d\tau$$

Операция интегрирования может быть дискретной. Это особенно целесообразно при использовании датчиков мгновенного расхода с импульсным выходом, частота импульсов которых пропорциональна скорости вращения крыльчатки. В таком случае интегрирование сводится к подсчету импульсов, что легко осуществляется шаговыми моторами.

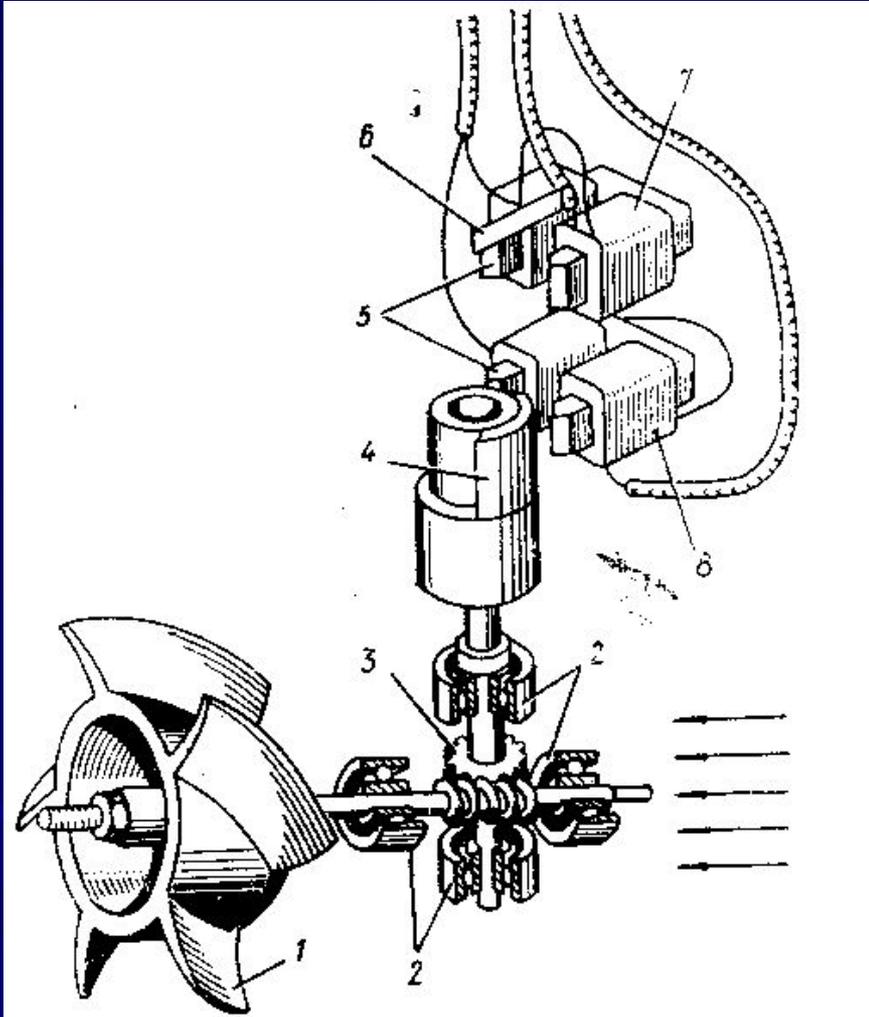
2.22. Расходомер топлива с ведущей крыльчаткой

Типовая структурная схема расходомера



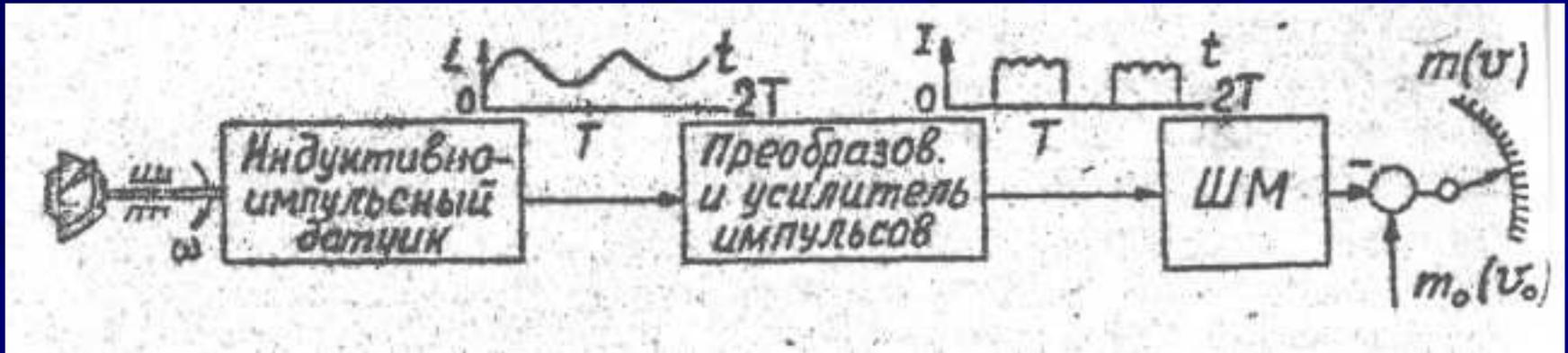
1 – втулка со стальным сердечником; 2 – магнитный шунт; 3 – катушка постоянной индуктивности; 4 катушка переменной индуктивности; 5 – крыльчатка; 6 – червячная передача

2.22. Расходомер топлива с ведущей крыльчаткой



Индуктивно-импульсный датчик преобразует вращение крыльчатки в электрические импульсы следующим образом. Крыльчатка 1 через червячную передачу 3 вращает втулку со стальным сердечником 4, являющимся звеном в магнитной цепи катушки переменной индуктивности 5. Последняя совместно с катушкой постоянной индуктивности 7 составляет схему индуктивного моста. Двумя другими плечами моста являются вторичные обмотки трансформатора, находящегося в преобразователе и усилителе импульсов.

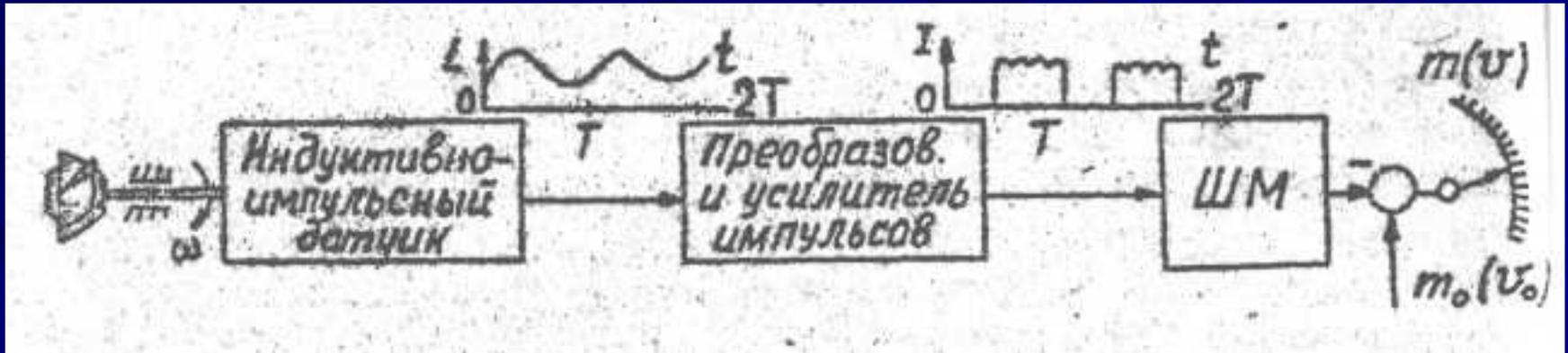
2.22. Расходомер топлива с ведущей крыльчаткой



Индуктивно-импульсный датчик можно рассматривать как устройство, преобразующее вращение крыльчатки в переменную индуктивность L , изменяющуюся с частотой, пропорциональной скорости вращения крыльчатки, а значит мгновенному объемному расходу топлива.

Преобразование изменений L в сигналы тока (напряжения) и их усиление может выполняться тиратронным прерывателем (в более старых системах) либо импульсным полупроводниковым усилителем. Выходные импульсы преобразователя приводят к перемещению стрелки указателя (или изменению показаний счетчика) шаговым двигателем (мотором) ШМ (обычно шаговым электромагнитом). “Цена” одного шага составляет обычно несколько л (кг).

2.22. Расходомер топлива с ведущей крыльчаткой



Суммирующие расходомеры, как правило, показывают не израсходованное, а оставшееся количество топлива. Для этого стрелки (счетчик) вначале устанавливаются кремальерой соответственно заправке топливом, а шаговый двигатель в процессе работы будет вычитать из начального значения количества топлива израсходованное.

2.22. Расходомер топлива с ведущей крыльчаткой

Погрешности скоростных суммирующих расходомеров

Методические погрешности, а также инструментальные погрешности гидравлической части суммирующих расходомеров вызываются теми же причинами, что и при измерении мгновенного расхода. Однако они имеют совершенно другой характер изменений во времени соответственно принципу действия - интегрированию мгновенного расхода, а значит и интегрированию погрешностей определения мгновенного расхода.

Следовательно, суммарные погрешности будут возрастать во времени. На отметке шкалы, соответствующей начальной заправке топливом, они будут нулевыми, а на нижней отметке шкалы наибольшими

$$\Delta m(t) = \Delta \rho \int_0^t v(\tau) d\tau$$

$$\Delta \rho = \rho - \rho^* = \text{const}$$

Если последнее условие не выполняется, т.е. величина плотности меняется с течением времени, то величина $\Delta \rho$ должна быть внесена под знак интегрирования.

С учетом этого технически удобнее поправки на изменение плотности формировать не непрерывно, а дискретно, по мере расхода определенной объемной дозы топлива.

2.22. Расходомер топлива с ведущей крыльчаткой

Погрешности скоростных суммирующих расходомеров

Такой принцип компенсации реализован в современных суммирующих расходомерах повышенной точности с массовой градуировкой. Значение Δv имеет порядок 200...400 л.

Сигнал поправки на выходе компенсационной схемы при этом можно представить в виде суммы

$$\Delta m(t) = \sum_{i=1}^n \Delta m_i = \sum_{i=1}^n \Delta \rho_i \Delta v_i$$

где $\Delta m_i = \Delta \rho_i \Delta v$ поправка, вырабатываемая при изменении количества топлива на величину Δv ;

$$\Delta \rho_i = \rho_i - \rho^* ;$$

ρ_i - плотность топлива на очередном шаге ввода поправки.

Погрешностями усилительных и исполнительных устройств суммирующих расходомеров можно пренебречь

Сравнительная оценка емкостных топливомеров и суммирующих расходомеров

По массогабаритным показателям очевидное преимущество имеют расходомеры, состоящие собственно из датчика, установленного в магистрали подачи топлива в двигатель, и интегрирующего устройства. Для работы топливомера необходима установка достаточно громоздких и массивных емкостных датчиков во всех топливных баках.

По вопросам технической эксплуатации преимущество также имеют расходомеры более простые в работе.

По точностным характеристикам предпочтительнее емкостные топливомеры, работающие по замкнутой схеме.

С увеличением времени полета относительные погрешности топливомера падают, а погрешности расходомера возрастают. Однако такая оценка справедлива только для горизонтального полета без ускорений.

По влиянию динамических факторов на точность и надежность работы системы преимущество имеют расходомеры. Их показания не зависят от маневрирования ЛА. Но они не будут обеспечивать контроль фактических остатков топлива в баках в случае появления не герметичности (в отличие от емкостных топливомеров).