

Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР  
Горьковский ордена Трудового Красного Знамени  
научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ)

Препринт № 186  
К ТЕОРИИ КОНТАКТНОГО РАДИОТЕРМОМЕТРА

В. С. Троицкий

Горький 1984

Проведено теоретическое рассмотрение разработанных в НИРФИ неразрушающих методов точных измерений внутренней температуры в диэлектриках и полупроводниках путем приёма и измерения их собственного теплового радиосигнала при контакте антенны-датчика с поверхностью тела. Разработана теория радиотермометра и методов исключения ошибок измерений за счёт отражений на границе тела и контактной антенны. Анализ дается, главным образом, применительно к измерению внутренней температуры различных органов тела человека и животных.

Показано, что для исключения главной ошибки измерений, получающейся вследствие неполного согласования антенны-датчика с телом, необходимо обеспечение термодинамического равновесия шумов входа радиотермометра и объекта измерения. Разработаны два способа установления такого равновесия: метод теплового квазиравновесия входа радиометра и объекта и метод равновесного поддумивания генератором шума. Последний позволяет наиболее точно установить термодинамическое равновесие шумов входа радиометра и объекта, обеспечивая системные ошибки измерений до  $0,1^{\circ}\text{C}$  при рассогласовании антенны до КСВ  $\sim 6$ . Рассмотрены различные конкретные схемы входа, обеспечивающие выполнение точных измерений и различные требования.

В настоящей работе делается попытка теоретического рассмотрения различных вариантов технических решений задачи точного измерения внутренней температуры различных тел и в особенности тела человека и животных при контактном (неразрушающем) съеме радиоизлучения с объекта.

Контактный съём излучения позволяет наиболее точно определить яркостную температуру радиоизлучения, подходящего к поверхности раздела изнутри тела. Конкретно говоря, он дает возможность ослабить или даже полностью исключить влияние коэффициента отражения от поверхности раздела.

Впервые контактный метод был использован для оценки глубинной температуры в теле человека в работах [1 - 3] и нашел в дальнейшем широкое применение в медико-биологических исследованиях. Как известно, для приёма слабого теплового радиоизлучения применяются специальные приёмники - радиометры, - широко используемые в радиоастрономии. Решение задачи исключения влияния поверхности раздела потребовало разработки специфических входных цепей радиометра, который стал существенно отличаться от радиометра, применяемого в радиотелескопах. В дальнейшем такой радиометр стал называться радиотермометром, что наиболее точно отражает сущность и назначение устройства.

В упомянутых выше пионерских работах применялись обыкновенные радиоастрономические радиометры, не обеспечивающие достаточную точность абсолютных измерений из-за отражений на границе раздела или, выражаясь техническим языком, из-за несогласования антенны с объектом.

Позднее в работах [4, 5] были предложены методы и схемы, позволяющие существенно ослабить ошибки из-за несогласования и обеспечить требуемую точность абсолютных измерений до  $0,1^{\circ}\text{C}$ .

Один из предложенных методов получил довольно полное теоретическое обоснование в работе [5]. Метод состоит в использовании теплового равновесия входных цепей радиометра и осуществлении внешней калибровки с помощью тепловых эталонов радиоизлучения.

Дальнейшие исследования привели к разработке еще более эффективных методов исключения влияния несогласования, а также к различным

модификациям известных методов [6, 7] .

Однако до настоящего времени не дано полного теоретического обоснования указанных новых предложений. В настоящей работе восполняется этот пробел и дается сравнительный анализ различных методов в особенности с точки зрения достижения высокой точности абсолютных измерений. При этом используется метод анализа, разработанный ранее в исследовании автора [5] .

## I. РАДИОТЕРМОМЕТРЫ С ТЕПЛОВЫМИ ШУМАМИ ВХОДА. МЕТОД ТЕПЛОВОГО РАВНОВЕСИЯ ВХОДНЫХ ЦЕПЕЙ

Рассмотрим типичную схему входа радиотермометра на рис. 1, в которой антенна соединена со входом СВЧ кабелем.

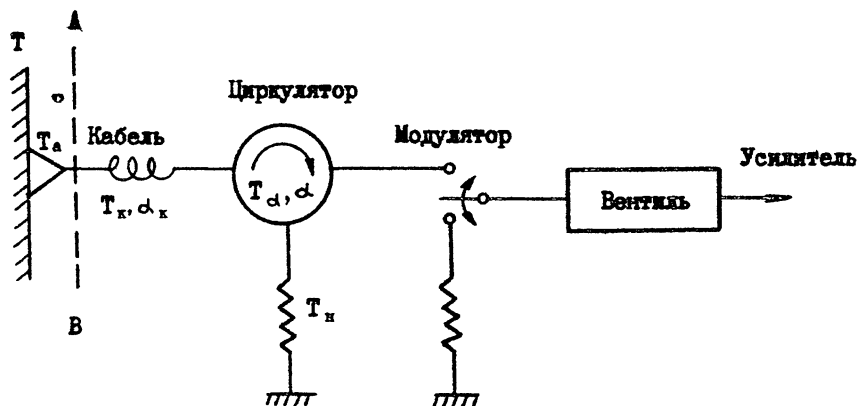


Рис.1 Схема входной части СВЧ радиотермометра с подшумливанием антенны тепловыми шумами

Найдем полную интенсивность шумов, поступающих на вход усилителя, когда антенна приведена в контакт с поверхностью какого-либо тела.

Пусть тело находится при температуре  $T$ , антенна при температуре  $T_A$ , кабель, связывающий антенну со входом, имеет температуру  $T_K$  и потери  $\alpha_K$ , циркулятор находится при температуре  $T_d$  и имеет потери  $\alpha$ . Циркулятор нагружен на согласованное сопротивление, находящееся при температуре  $T_H$ . В общем случае антенна не согласована

с телом и имеет место отражение, определяемое коэффициентом отражения по мощности  $\Gamma^2$  как для излучения, идущего из тела, так и для шумового напряжения, поступающего в антенну от тепловых шумов нагрузки и элементов схемы. Обозначим КПД антенны  $\eta_a = 1 - \gamma_a$ , где  $\gamma_a$  - потери в антенне. Температура шумов на выходе антенны в сечении АВ, следуя [5], будет

$$T_a = \left[ T + (T_a - T) \gamma_a \right] (1 - \Gamma^2) + T_H (1 - \alpha) (1 - \alpha_K) \Gamma^2 + T_{\alpha} \alpha (1 - \alpha_K) \Gamma^2 + T_K \alpha_K \Gamma^2. \quad (1)$$

Здесь первый член является суммой из сигнала, принимаемого антенной,  $T \eta_a (1 - \Gamma^2)$ , и собственного шума антенны  $T_a \gamma_a (1 - \Gamma^2)$ . Второй член дает шумы от нагрузки циркулятора, ослабленные на потери в циркуляторе и кабеле, и далее отраженные от границы антенна - тело (для краткости будем говорить об отражении от антенны). Третий член соответствует шумам циркулятора, отраженным от антенны, четвертый - тоже самое для шумов кабеля.

Если все перечисленные элементы, в том числе и объект, находятся в тепловом равновесии, т.е. имеют одинаковую температуру, то должно быть  $T_a = T$ , в чем нетрудно убедиться, подставляя в (1)  $T_a = T_K = T_{\alpha} = T_H = T$ .

Сигнал, заданный в (1), создаст на выходе измерителя некоторое напряжение, определяемое выходным прибором, например, в единицах длины  $\eta$ , и т.п. Величина выхода будет пропорциональна сигналу  $T_a$  и, кроме того, может содержать некоторый добавок, связанный с шумами последующей цепи входа и с неучитываемыми эффектами работы остальной части схемы. В результате отсчитываемой величиной является

$$\eta = k T_a + \eta_0, \quad (2)$$

где  $\eta_0$  - неучитываемый добавочный выход.

Задачей измерений является определение  $T_a$  и, далее по формуле (1), неизвестной температуры тела. Для нахождения  $T_a$  нужно определить коэффициент передачи  $k$  и свободный член  $\eta_0$ .

Определение  $k$  можно осуществить, если произвести два замера:  $\eta_1$  и  $\eta_2$  при подаче на антенну строго известных сигналов. Это можно сделать, приведя в контакт антенну с телами, температура которых строго известна и равна, например,  $T_1$  и  $T_2$ . Таким образом будет произведена калибровка. После калибровки антенна соединяется с те-

лом, температура которого измеряется. Будем обозначать её в дальнейшем через  $T_3$ .

Во всех трех замерах в сечении АВ входа образуются соответствующие сигналы  $T_{я1}$ ,  $T_{я2}$  и  $T_{я3}$ , связанные с  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  соотношением (I). В результате мы получаем три уравнения:  $n_1 = kT_{я1} + n_0$ ,  $n_2 = kT_{я2} + n_0$ ,  $n_3 = kT_{я3} + n_0$  и ещё три уравнения, связывающие  $T_{яi}$  с  $T_i$ ;  $i = 1, 2, 3$  согласно формуле (I). Разумеется при замерах должна быть соблюдена неизменность добавки  $n_0$  и коэффициента передачи  $k$ , что достигается обеспечением стабильности параметров всех цепей радиотермометра.

Добавочный член  $n_0$  в каждом из замеров говорит о том, что само по себе  $n$  — условная, относительная величина, связанная с измеряемым сигналом не только через записанные параметры, но ещё и многими другими характеристиками схемы. Существенно то, что эти параметры не должны меняться, что мы и будем предполагать. Неизменность влияющих параметров или стабильность измерителя определяются рядом известных мер, и о них мы говорить не будем. Из сказанного очевидно, что значимыми величинами будут разности соответствующих показаний выходного прибора. В соответствии с этим для решения полученных соотношений находим разности  $n_2 - n_1$  и  $n_3 - n_1$ . Первая разность дает калибровочный сигнал, вторая связана с сигналом от измеряемого тела. Оба выхода, как видно, определяются по отношению к некоторому опорному выходу  $n_1$ . Из полученных соотношений находим

$$T_{я3} - T_{я1} = \frac{n_3 - n_1}{n_2 - n_1} (T_{я2} - T_{я1}). \quad (3)$$

Подчеркнём ещё раз, что здесь, по крайней мере в принципе, неизвестный сигнал определяется по отношению к строго известному опорному сигналу  $T_{я1}$  и известной калибровочной разности  $T_{я2} - T_{я1}$ .

Далее, зная  $T_{я3}$ , по формуле (I) должна быть найдена неизвестная температура объекта  $T_3$ . Поэтому формула (I), по которой нужно найти  $T_3$ , должна содержать только точно известные параметры. Действительно, все параметры  $\Gamma_3$ ,  $\alpha$ ,  $\alpha_k$ ,  $\gamma_a$ ,  $T_a$ ,  $T_k$ ,  $T_n$  в принципе могут быть известны, однако очевидно, что их учет будет вносить значительную ошибку, поэтому главным является найти способ существенного сокращения влияющих параметров. Оказывается такой способ может быть предложен и не один.

В работах [4, 5] предложен способ термодинамического равновесия

шумов входа, имеющий место при тепловом равновесии всех элементов входа измерителя. Для пояснения этого способа перепишем уравнение (1), комбинируя его члены в виде

$$T_{\text{я}i} = [T_i + (T_a - T_i)\gamma_a](1 - \Gamma_i^2) + [(T_k - T_n)\alpha_k + (T_d - T_n)\alpha(1 - \alpha_k) + T_n]\Gamma_i^2 \quad (4)$$

где  $i = 1, 2, 3$  означают номера замеров - опорный, калибровочный, измерительный.

Далее запишем значения  $T_{\text{я}i}$ ,  $i = 1, 2, 3$  для всех трех замеров. Согласно (4) имеем

$$\begin{aligned} T_{\text{я}1} &= [T_1 + (T_a - T_1)\gamma_a](1 - \Gamma_1^2) + [(T_k - T_n)\alpha_k + (T_d - T_n)\alpha(1 - \alpha_k) + T_n]\Gamma_1^2, \\ T_{\text{я}2} &= [T_2 + (T_a - T_2)\gamma_a](1 - \Gamma_2^2) + [(T_k - T_n)\alpha_k + (T_d - T_n)\alpha(1 - \alpha_k) + T_n]\Gamma_2^2, \quad (5) \\ T_{\text{я}3} &= [T_3 + (T_a - T_3)\gamma_a](1 - \Gamma_3^2) + [(T_k - T_n)\alpha_k + (T_d - T_n)\alpha(1 - \alpha_k) + T_n]\Gamma_3^2. \end{aligned}$$

При этой записи мы предполагаем, что КПД антенны практически не зависит от свойств измеряемого объекта или эталонов, т.е. во всех случаях потери равны  $\gamma_a$ . В действительности  $\gamma_a$  может слегка зависеть от диэлектрических свойств среды объекта и эталонов. Однако эти эффекты будут второго порядка малости по отношению к единице ( $\gamma_a$  - первого порядка малости). При достаточно малом  $\gamma_a \leq 0,1$  его изменениями для разных замеров можно пренебречь.

Из (5) видно, что для исключения влияния на измерение параметров входа, т.е. затухания кабеля, циркулятора и их шумов целесообразно установить равенство температур кабеля и циркулятора с температурой его нагрузки, т.е.  $T_k = T_d = T_n$ . При этом, однако, еще не исключается влияние таких плохо известных параметров, как  $\gamma_a$ ,  $T_a$ ,  $\Gamma_1^2$ ,  $\Gamma_2^2$ ,  $\Gamma_3^2$ , а также требуется измерение  $T_n$ .

Поэтому эта мера недостаточна для обеспечения точных измерений.

Радикальным способом является установление полного теплового равновесия в системе тало - входные цепи. Для первого замера это означает  $T_k = T_d = T_n = T_a = T_1$ , для второго  $T_k = T_d = T_n = T_a = T_2$  и для третьего  $T_k = T_d = T_n = T_a = T_3$ . При этом согласно (5) получаем выражения  $T_{\text{я}i}$  через точно измеряемые обыкновенные температуры  $T_{\text{я}1} = T_1$ ,  $T_{\text{я}2} = T_2$  и  $T_{\text{я}3} = T_3$ , откуда согласно (3)

$$T_3 - T_1 = \frac{n_3 - n_1}{n_2 - n_1} (T_2 - T_1). \quad (6)$$

Таким образом, результат измерения при этом совсем не зависит от параметров схемы, а также от несогласования антенны с телом и задача измерений решается идеально. Однако, не говоря уже о практической трудности или даже невозможности достаточно быстрой перестройки температуры элементов входа для установления полного теплового равновесия входа с эталонами и телом, установление равновесия с телом в принципе исключается, т.к. нужно знать до опыта  $T_3$ , но тогда необходимость в самом измерении отпадает. Можно, конечно, применить метод последовательных приближений. Однако не менее важным, чем точность, является приемлемое время измерений, которое в этом случае сильно увеличивается. Таким образом, практически, в схеме с термодинамическим равновесием шумов, достигаемом регулировкой тепловых шумов, т.е. температуры элементов входа, реально установление равновесия только для одного замера, например, опорного.

При этом  $T_a = T_d = T_k = T_H = T_1$  устанавливается для всех замеров, тогда согласно (4) имеем

$$T_{я1} = T_1, T_{я2} = T_2 \eta (1 - \Gamma_2^2) + T_1 \gamma_a (1 - \Gamma_2^2) + T_1 \Gamma_2^2; T_{я3} = T_3 \eta (1 - \Gamma_3^2) + T_1 \gamma_a (1 - \Gamma_3^2) + T_1 \Gamma_3^2.$$

Соответствующие разности будут  $T_{я2} - T_{я1} = (T_2 - T_1) \eta (1 - \Gamma_2^2)$  и  $T_{я3} - T_{я1} = (T_3 - T_1) \eta (1 - \Gamma_3^2)$  откуда согласно (3)

$$T_3 - T_1 = \frac{n_3 - n_1}{n_2 - n_1} \frac{1 - \Gamma_2^2}{1 - \Gamma_3^2} (T_2 - T_1). \quad (7)$$

В этом случае влияние несогласования не исключается полностью и при  $\Gamma_2^2 = 0$ ,  $\Gamma_3^2 \approx 0,1$ , если не вносить поправку, возникает ошибка в определении  $T_3 - T_1$  порядка 10%, что при  $T_3 - T_1 \approx \pm 5^\circ$  дает абсолютную ошибку  $\sim 0,5^\circ\text{C}$ .

Любопытно, что если устанавливать полное тепловое равновесие для двух замеров, то улучшение в измерении не наступает. Действительно, в этом случае  $T_{я2} - T_{я1} = T_2 - T_1$ , но  $T_{я3} - T_{я1} = (T_3 - T_1) \eta (1 - \Gamma_3^2)$  и согласно (3)

$$T_3 - T_1 = \frac{n_3 - n_1}{n_2 - n_1} \frac{T_2 - T_1}{(1 - \Gamma_3^2) \eta}.$$



В результате появляется дополнительная ошибка, связанная с плохо определяемым параметром  $\eta$  - КПД антенны.

Рассмотрим теперь случай, когда равновесная температура выбирается произвольной, отличаясь от  $T_1$  и  $T_2$ . Обозначим её  $T_4$ . Подставляя в (4)  $T_a = T_k = T_d = T_H = T_4$ , находим соответствующие разности и согласно (3) будем иметь

$$T_3 - T_1 + (T_4 - T_3)\Gamma_3^2 + (T_4 - T_1)\Gamma_1^2 = \frac{n_3 - n_1}{n_2 - n_1} \left[ T_2 - T_1 + (T_4 - T_2)\Gamma_2^2 - (T_4 - T_1)\Gamma_1^2 \right]. \quad (8)$$

Таким образом при этом влияют все коэффициенты отражения, увеличивая вероятность ошибки. Если положить здесь  $T_4 = T_1$ , то получим рассмотренный выше случай, и (8) переходит в (7).

Допустим теперь, что мы можем установить тепловое равновесие на измеряемой температуре, т.е. когда  $T_a = T_k = T_d = T_H = T_3$ , тогда согласно (8)

$$T_3 - T_1 = \frac{n_3 - n_1}{n_2 - n_1} \frac{T_2 - T_1 + (T_3 - T_2)\Gamma_2^2 - (T_3 - T_1)\Gamma_1^2}{1 - \Gamma_1^2}. \quad (9)$$

Это выражение содержит столько же влияющих коэффициентов отражения, сколько и (7) для случая установки равновесия на эталоне  $T_1$ , и поэтому кажется, что такой способ не дает преимуществ. Однако это совсем не так. Замечательно, что в выражение (9) совсем не входит несогласование с измеряемым телом, т.е. влияние несогласования с телом на измерение полностью исключается!

Влияние же несогласований с эталонами можно практически полностью устранить. В связи с тем, что тела эталонов идентичны и неизменны, мы всегда можем сделать так, что  $\Gamma_1^2 = \Gamma_2^2$ . Кроме того, последние могут быть сделаны достаточно малыми, близкими к нулю. Полагая  $\Gamma_1^2 = \Gamma_2^2 \approx 0$ , получаем с хорошей точностью

$$T_3 - T_1 = \frac{n_3 - n_1}{n_2 - n_1} (T_2 - T_1), \quad (10)$$

т.е. имеем идеальный случай измерений.

Из выражения (5) видно, что подогрев кабеля до температуры  $T_k = T_H$  исключает влияние его шумов на измерения, однако практическое осуществление нагрева и поддержания температуры кабеля на нужном уровне

не затруднительно. Опеним ошибку, которая возникает, если не вести подогрев кабеля и считать, что его температура равна комнатной. И так, пусть  $T_a = T_\alpha = T_H = T_1$ ,  $T_K = T_0$ . Согласно (5)

$$T_{я2} - T_{я1} = (T_2 - T_1) \eta_2 (1 - \Gamma_2^2) + (T_0 - T_1) \alpha_K (\Gamma_2^2 - \Gamma_1^2),$$

$$T_{я3} - T_{я1} = (T_3 - T_1) \eta_3 (1 - \Gamma_3^2) + (T_0 - T_1) \alpha_K (\Gamma_3^2 - \Gamma_1^2).$$

Для калибровки обычно  $\Gamma_2^2 = \Gamma_1^2 \approx 0$  поскольку используются одни и те же тела (вода + глицерин), только находящиеся при слегка разной температуре  $T_1$  и  $T_2$ .

При этом абсолютная ошибка будет равна  $\Delta T = (T_0 - T_1) \alpha_K \Gamma_3^2 \eta_3^{-1}$ . Температура  $T_1$  опорного эталона берется равной средней температуре человеческого тела, что дает разность  $T_1 - T_0 \approx 15 - 20^\circ\text{C}$ . При  $\alpha_K = 0,3$ ,  $\Gamma_3^2 \approx 0,1$  для  $\eta_3 = 1$  ошибка  $\Delta T = 0,5^\circ\text{C}$ . Эта величина хорошо согласуется с практически наблюдаемой погрешностью и далеко выходит за рамки допустимой в медицинских исследованиях погрешности  $\sim 0,1^\circ\text{C}$ .

### I.I. Обсуждение результатов

В результате анализа различных вариантов можно сделать вывод, что тепловое равновесие входных цепей и калибровка позволяют проводить абсолютные измерения с минимальными погрешностями. Установление теплового равновесия во всех замерах позволяет полностью исключить влияние рассогласования антенны с телом. Хорошим приближением к этому идеальному случаю являются измерения при тепловом равновесии, устанавливаемом только для замера тела. Однако в обоих этих случаях возникает проблема способа установления теплового равновесия и неудобство в связи с необходимостью отслеживания температуры нагрева в соответствии с изменением сигнала.

В силу сказанного достаточно просто осуществимым случаем является в настоящее время способ теплового равновесия входа, устанавливаемого для опорного замера, что приводит к выражению (7) для измеряемого сигнала. Для уменьшения ошибки, как видно из (7), нужно выбирать опорную температуру  $T_1$ , равной средней величине измеряемой температуры. Для тела человека  $T_3$  меняется не более чем на  $\pm 5^\circ$  от  $37^\circ\text{C}$ . Следовательно,  $T_1 = 273 + 37 = 310^\circ\text{K}$ . Далее ошибку за счет несогласования можно снизить до допустимого предела, устанавливая

$\Gamma_2^2$  равной средней величине  $\overline{\Gamma_3^2}$ . Обычно  $\Gamma_3^2$  для тела человека варьирует от 0 до 0,1 и в среднем  $\overline{\Gamma_3^2} \approx 0,05$ . Устанавливая  $\Gamma^2 = \Gamma_3^2 = 0,05$ , мы получаем, что все вариации отношения  $(I - \Gamma_2^2)/(I - \Gamma_3^2)$  будут в пределах  $\pm 5\%$ . Для максимальной в медицинских измерениях разности  $T_3 - T_1 \approx \pm 5^\circ\text{C}$  получаем абсолютную ошибку измерения температуры  $\Delta T = \pm 0,2^\circ\text{C}$ .

Вариант измерений с использованием теплового равновесия для опорного замера является в настоящее время основным и используется во всех радиотермометрах, предназначенных для абсолютных измерений.

Прежде чем переходить к дальнейшему анализу, остановимся, несколько, на пояснении физической сущности исключения влияния рассогласования.

Допустим, что кабель, циркулятор и антенна не имеют потерь, т.е.  $\gamma_a = \alpha = \alpha_k = 0$  и, следовательно, являются идеальными. При этом согласо (I), (4) сигнал на выходе антенны, соединенной с телом, имеющей температуру  $T_3$ , будет равен

$$T_{\text{я3}} = T_3(1 - \Gamma_3^2) + T_{\text{н}}\Gamma_3^2 = T_3 - (T_3 - T_{\text{н}})\Gamma_3^2. \quad (\text{II})$$

Здесь  $T_3(1 - \Gamma_3^2)$  — сигнал, идущий из тела и ослабленный на величину  $T_3\Gamma_3^2$ , связанную с рассогласованием, а  $T_{\text{н}}\Gamma_3^2$  — шум нагрузки циркулятора, который поступает в антенну через идеальный циркулятор, отражается от перехода антенна — тело и даёт дополнительный сигнал к измеряемому сигналу. При тепловом равновесии нагрузки и тела, т.е. когда  $T_3 = T_{\text{н}}$ , добавочный шум  $T_{\text{н}}\Gamma_3^2$  в точности равен потере сигнала  $T_3\Gamma_3^2$  из-за несогласования. Этот процесс наглядно представлен на рис. 2.

Таким образом, исключение влияния отражения достигается подшумливанием антенны от постороннего источника шумов. Для реальных устройств, имеющих потери, ситуация подшумливания становится такой же, как для идеальной схемы без потерь при установлении теплового равновесия всех элементов, при этом потери как бы не существуют и  $T_{\text{я3}}$  совпадает с (II).

В этом разделе мы рассмотрели методы установления компенсирующего подшумливания, используя только тепловые шумы элементов входа, зависящие от температуры.

Это потребовало соответствующей установки температуры входных цепей.

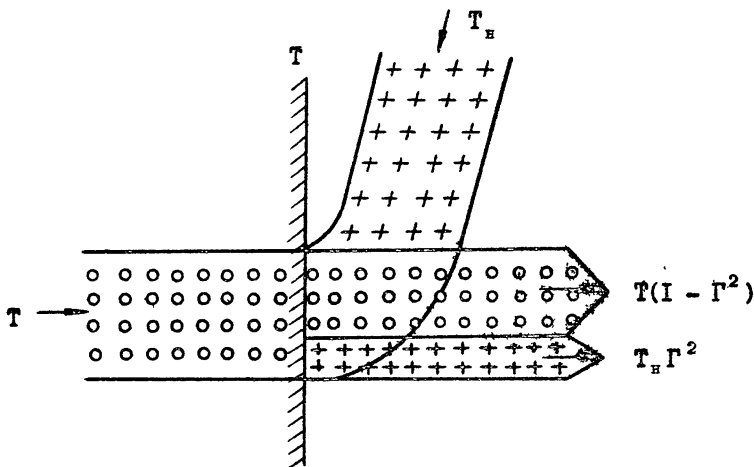


Рис. 2 Компенсация потери сигнала  $T\Gamma^2$  при отражении с помощью подшумливания антенны шумами интенсивностью  $T_H$

Очевидно, что оперативное регулирование подшумливания в этом случае практически исключено, что и приводит к необходимости его установки раз и навсегда для опорного замера  $T_1$ . Между тем для подшумливания, как очевидно, возможно применение любых шумовых сигналов, что рассматривается в следующем разделе.

## 2. РАДИОТЕРМОМЕТРЫ С РЕГУЛИРУЕМЫМИ ШУМАМИ ВХОДА. МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА ТЕПЛООВОГО РАВНОВЕСИЯ

В предыдущем анализе мы рассматривали измерение при введении в антенну подшумливания от теплового источника шума, имеющего температуру  $T_H$ . Влияние шума остальных цепей входа и их параметров исключалось установлением теплового равновесия элементов входа. Таким образом, интенсивность подшумливания оказывалась строго известной и равной  $T_H$ . При отсутствии теплового равновесия величина подшумливания неизвестна и зависит от многих параметров входной цепи. В связи с этим возникает проблема метода установки нужной величины подшумливания для компенсации влияния рассогласования антенны. Очевидно уравнение (4) можно записать аналогично (II)

$$T_{\text{яi}} = T_{\text{ia}}(1 - \Gamma_i^2) + T_e \Gamma_i^2 = T_{\text{ia}} + (T_e - T_{\text{ia}})\Gamma_i^2, \quad (12)$$

где  $T_{ia} = T_i + (T_a - T_i) \gamma_a$  - сигнал на выходе антенны, а  $T_e$  - эквивалентная температура всей суммы шумов входа, равная

$$T_e = T_H + (T_K - T_H) \alpha_K + (T_a - T_H) \alpha (1 - \alpha_K). \quad (13)$$

Из выражений видно, что, вообще говоря, не обязательно устанавливать тепловое равновесие входных элементов, чтобы компенсировать влияние  $\Gamma^2$ . Можно получить компенсацию, регулируя  $T_e$  путем изменения  $T_H$  при произвольных температурах остальных элементов входа. Следовательно, необходим легко регулируемый источник шума  $T_H$  и метод индикации равенства  $T_e = T_{ia}$ .

В качестве источника шума может служить любой регулируемый генератор белого шума. Поскольку все же циркулятор должен быть нагружен на согласованное сопротивление, то удобно часть шума  $T_H$  обеспечивать тепловым шумом нагрузки, нагретой до температуры  $T_0$ , существенно меньшей, чем измеряемая температура, а добавочный шум подавать от генератора шума так, чтобы  $T_H = T_0 + t_s$ , причем  $t_s$  варьируется от  $t_s \approx 0$  до заданной величины порядка 10–20°C в случае медицинских применений, когда  $T_0$  близка к комнатной температуре. Соответствующая схема представлена на рис. 3.

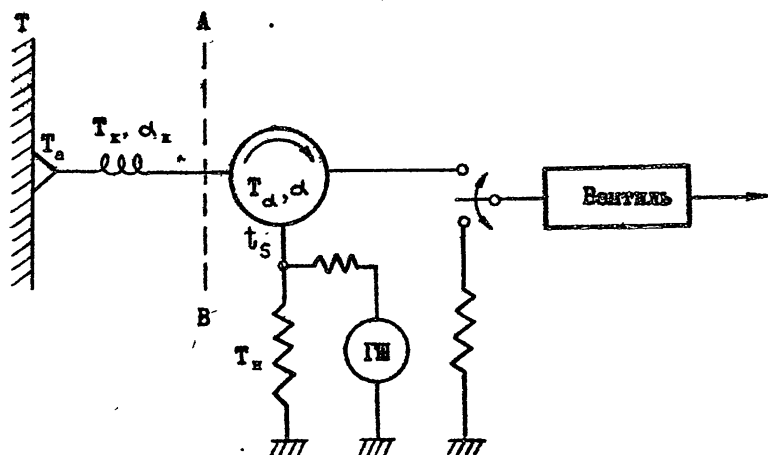


Рис. 3 Схема входной части радиотермометра с регулируемым шумом и подшумливания антенны

Как уже говорилось, при этом возникает задача: каким образом, регулируя генератором шума величину  $T_H$ , индцировать равенство подшумливания с измеряемым сигналом, что требуется соотношением (I2), для компенсации влияния несогласования. Этот способ предложен В.Д. Рахлиным [7].

Рассмотрим способ на примере, когда антенна соединена с эталоном. Этот замер дает выход

$$\eta_1 = K T_{y1} + \eta_0, \quad T_{y1} = [T_1 + (T_a - T_1) \chi_a] (1 - \Gamma_1^2) + T_e \Gamma_1^2. \quad (I4)$$

Как видно из (I3),  $T_e$  является линейной функцией  $T_H$  (или  $t_s$ ):

$$T_e = \beta T_H + a. \quad (I5)$$

Следующее измерение выхода делается при закорачивании антенны. При этом создаются условия, когда несогласование  $\Gamma^2 = I$ . Если антенна - открытый конец волновода, то условие  $\Gamma^2 = I$  получится при закрытии волновода металлом. Обычно антенна согласована с телом и водой и совсем несогласована со свободным пространством, поэтому, помещая антенну в пространстве, получаем также  $\Gamma^2 \approx I$ . Выход  $\eta_{кз}$  при коротком замыкании антенны будет согласно (I4)

$$\eta_{кз} = K T_e + \eta_0. \quad (I6)$$

В общем случае  $\eta_1 \neq \eta_{кз}$ . В работе [7] предлагается установить такое  $T_e = f(T_H)$ , чтобы выход  $\eta_1$  замера эталона был бы равен выходу при коротком замыкании, т.е.  $\eta_1 = \eta_{кз}$ . Для установления такого подшумливания  $T_H$  можно, например, снять зависимость  $\eta_1$  и  $\eta_{кз}$  от  $T_H$ , которые будут, как видно из формул (I), (2), линейными. Пересечение прямых, как показано на рис. 4, даст значение  $T_{H1}$ , при котором  $\eta_1 = \eta_{кз}$ . Можно, не снимая кривых, воспользоваться методом последовательных приближений. На том же рисунке стрелками показана процедура последовательных приближений. Если вначале  $\eta_{кз}$  окажется меньше  $\eta_1$ , то, увеличивая  $T_H$  до какого-либо значения, отмеченного цифрой 2, снова замеряется  $\eta_1$ , и, если оно опять меньше  $\eta_{кз}$ , снова увеличивается  $T_H$  до положения 3 и т.д. При  $\eta_1 = \eta_{кз}$  получаем из (I4), (I5) значение  $T_e$ , которое мы обозначим, как  $T_{e1}$ , отмечая значком, что это значение эквивалентного подшумливания определено для замера  $T_1$ ,

тогда

$$T_{e1} = T_1 + (T_a - T_1) \gamma_a, \quad (I7)$$

этому значению  $T_{e1}$  соответствует согласно (I5) определенная величина подшумливания  $T_{H1}$  от генератора шума.

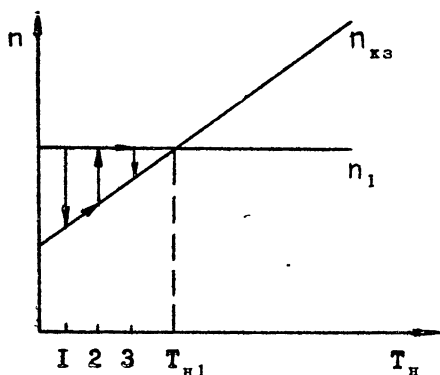


Рис. 4 Кривые изменения выхода радиотермометра в зависимости от интенсивности подшумливания. Кривая  $n_1$  — когда антенна соединена с эталоном  $T_1$ ,  $n_{кз}$  — когда антенна замкнута накоротко. Ломанная кривая — последовательное приближение к подшумливаю, при котором  $n_1 = n_{кз}$

Подставляя (I7) в (I4) получим

$$T_{я1} = T_1 + (T_a - T_1) \gamma_a,$$

т.е.  $T_{я1}$  в точности равна сигналу, который, в общем случае, неизвестен. В результате получаем

$$n_1 \doteq n_{кз} = k [T_1 + (T_a - T_1) \gamma_a] + n_0. \quad (I8)$$

При  $T_a = T_1$  выход  $n_1 = n_{кз}$  пропорционален только величине  $T_1$ , и никакие другие параметры схемы, в том числе несогласование, не влияют на выход.

Таким образом, устанавливая подшумливание по указанной процедуре, мы полностью избавляемся от влияния отражения, как и в случае подшумливания, устанавливаемого тепловыми шумами путем теплового равновесия всех элементов входа измерителя.

Рассмотрим теперь полную процедуру измерения неизвестной температуры тела для случая, когда подшумливание, установленное исходя из равенства  $n_1 = n_{кз}$ , сохраняется для всех замеров, аналогично то-

му, как это имело место при поддумливания с использованием теплового равновесия входа для замера с эталоном  $T_1$ .

Запишем все соотношения процедуры измерений после установки  $T_{н1}$ . Здесь, для наглядности, представим выходные показания через  $n$ , а в дальнейшем будем пользоваться для расчетов, как и выше, яркостными температурами

$$\begin{aligned} n_1 &= n_{кз} = K [T_1 + (T_a - T_1)\gamma_a] + n_0, \\ n_2 &= K \left\{ [T_2 + (T_a - T_2)\gamma_a](1 - \Gamma_2^2) + T_{e1}\Gamma_2^2 \right\} + n_0, \\ n_3 &= K \left\{ [T_3 + (T_a - T_3)\gamma_a](1 - \Gamma_3^2) + T_{e1}\Gamma_3^2 \right\} + n_0. \end{aligned} \quad (19)$$

Подставляя значение  $T_{e1}$  из (17), получаем

$$\begin{aligned} n_2 - n_1 &= K\eta(T_2 - T_1)(1 - \Gamma_2^2), \\ n_3 - n_1 &= K\eta(T_3 - T_1)(1 - \Gamma_3^2), \end{aligned}$$

и, наконец, исключая  $K\eta$ , будем иметь окончательно

$$T_3 - T_1 = \frac{n_3 - n_1}{n_2 - n_1} \frac{1 - \Gamma_2^2}{1 - \Gamma_3^2} (T_2 - T_1). \quad (20)$$

Это выражение, как и должно быть, полностью совпадает с (7). Следовательно, в отношении качества измерений здесь имеется полная аналогия с рассмотренными выше измерениями при тепловом равновесии, устанавливаемом точно только для опорного эталонного сигнала.

Однако имеется существенное техническое отличие - температура элементов входа может отличаться от  $T_1$ , например, равняться комнатной температуре или даже иметь различные температуры  $T_a, T_k, T_a$ . Это является некоторым преимуществом, но надо помнить, что указанные температуры не должны меняться в процессе измерений, т.е. температурная стабилизация элементов входа совершенно необходима. Практически, по-видимому, в ряде случаев легче поддерживать температуру всех элементов одинаковой, однако не обязательно близкой к  $T_1$  или  $T_3$ .

Итак, рассмотренный метод поддумливания, основанный на использовании неравновесных шумов, имеет преимущество перед использованием



равновесных тепловых шумов в том, что, во-первых, нет необходимости все элементы входа стабилизировать на строго одной и той же температуре и, во-вторых, это главное, позволяет установить равновесие шумов для всех трех замеров:  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ .

Последнее очень важно, так как дает возможность полностью исключить влияние несогласования. Действительно, из сказанного выше, очевидно, что для такого измерения нужно установить значение  $T_{н1}$ , дающее  $n_1 = n_{кз1}$ , значение  $T_{н2}$  для  $n_2 = n_{кз2}$  и, наконец,  $T_{н3}$ , при котором  $n_3 = n_{кз3}$ . Этот процесс изображен на рис. 5. При всех этих

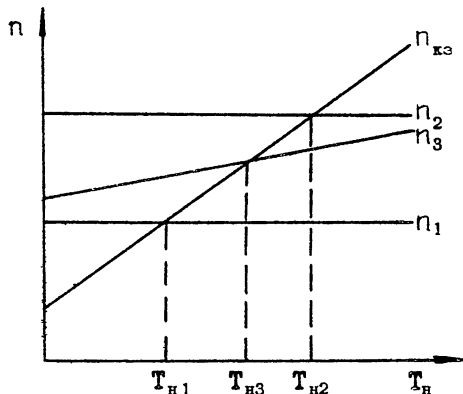


Рис. 5 Кривые изменения выхода радиотермометра в зависимости от интенсивности подшумливания при соединении антенны соответственно с эталонами ( $n_1, n_2$ ) и телом ( $n_3$ ), а также при её замыкании ( $n_{кз}$ )

замерах согласно (I7) эквивалентная температура подшумливания будет

$$T_{я1} = T_1 + (T_a - T_1) \gamma_a = T_{e1},$$

$$T_{я2} = T_2 + (T_a - T_2) \gamma_a = T_{e2}, \quad (21)$$

$$T_{я3} = T_3 + (T_a - T_3) \gamma_a = T_{e3}.$$

Далее находя разности  $T_{я}$  и подставляя в (3), получим

$$T_3 - T_1 = \frac{n_3 - n_1}{n_2 - n_1} (T_2 - T_1). \quad (22)$$

Этот же результат можно получить в выражении через величины  $T_{нi}$ ,  $i = 1, 2, 3$ .

Действительно, величина  $T_e$  линейно связана с регулируемым и известным шумом  $T_{н}$ , т.е. согласно (I5) можно записать

$$\begin{aligned} T_{e1} &= \beta T_{H1} + a, \\ T_{e2} &= \beta T_{H2} + a, \\ T_{e3} &= \beta T_{H3} + a. \end{aligned} \quad (23)$$

Отсюда, исключая  $\beta$  и  $a$ , находим, принимая во внимание выражения (21) для  $T_{ei}$ , что

$$T_3 - T_1 = (T_2 - T_1) \frac{T_{H3} - T_{H1}}{T_{H2} - T_{H1}}. \quad (24)$$

Тождественность двух способов расчета легко видеть из рис. 3. Однако второй способ требует применения калиброванного источника шумов  $T_H$ . Таким образом, найден способ полностью исключить влияние несогласования антенны-датчика с объектом.

Как видно из формул, даже полное несогласование ( $\Gamma_3^2 = 1$ ) не искажает результат. Однако при  $\Gamma^2 \approx 1$  возникает ошибка другого рода, вытекающая из невозможности точно установить  $T_{H3}$ , так как при этом зависимости  $\eta_3 = \eta_3(T_H)$  и  $\eta_{K3} = \eta_{K3}(T_H)$  совпадают. Действительно, первая функция, как и вторая, соответствует  $\Gamma^2 = 1$ , т.е. прямые сливаются, и  $\eta_3$ ,  $T_{H3}$  неопределенны. Максимальное расхождение наклонов кривых рис. 4 будет иметь место при  $\Gamma_3^2 = 0$ , и точность фиксации пересечения кривых будет максимальна.

Рассмотрим случай, когда равновесное подшумливание устанавливается только для измеряемого тела. При этом

$$\begin{aligned} T_{я3} &= T_{e3} = T_3 + (T_a - T_3) \gamma_a, \\ T_{я1} &= [T_1 + (T_a - T_1) \gamma_a] (1 - \Gamma_1^2) + [T_3 + (T_a - T_3) \gamma_a] \Gamma_1^2, \\ T_{я2} &= [T_2 + (T_a - T_2) \gamma_a] (1 - \Gamma_2^2) + [T_3 + (T_a - T_3) \gamma_a] \Gamma_2^2. \end{aligned} \quad (25)$$

Согласно (3), получим

$$T_3 - T_1 = \frac{\eta_3 - \eta_1}{\eta_2 - \eta_1} \frac{1}{1 - \Gamma_1^2} [T_2 - T_1 + \Gamma_2^2 (T_3 - T_2) - \Gamma_1^2 (T_3 - T_1)]. \quad (26)$$

Это выражение полностью совпадает с (9) и, как в том случае, сильно упрощается, если учесть, что для эталонов можно с большой точностью установить равенство коэффициентов отражения и близость их к нулю.

Положим  $\Gamma_1^2 = \Gamma_2^2 \pm 0,01$ , что вполне достижимо, тогда с ошибкой не более 1%

$$T_3 - T_1 = \frac{n_3 - n_1}{n_2 - n_1} (T_2 - T_1). \quad (27)$$

Таким образом, для практически полного исключения влияния несогласования достаточно установления равновесия лишь для одного замера, соответствующего измерению температуры объекта.

Рассмотрим теперь вопрос о возможных погрешностях этого метода поддумливания. Главным источником ошибки может быть то, что при замыкании антенны, как правило,  $\Gamma^2 \neq 1$ . Положим  $\Gamma^2 = 1 - \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  - некоторая небольшая величина. Практически, по-видимому, она не менее  $\varepsilon = 0,05 - 0,1$ . Согласно (14) в этом случае

$$n_{K3} = K \left\{ [T + (T_a - T)\gamma_a] \varepsilon + (1 - \varepsilon) T_e \right\} + n_0, \quad (28)$$

что отличается от (18) при  $\Gamma^2 = 1$ . Здесь, как очевидно, под температурой  $T$  нужно понимать температуру металла, которым замыкается антенна, или температуру фона, когда антенна остается в свободном пространстве.

Рассмотрим сначала случай, когда значение  $T_e$  устанавливается одно и то же для всех замеров, по равенству  $n_{K3} = n_1$ . Используя выражение (14) для  $n_1$ , приравняв с (28), найдем соответствующее значение поддумливания:

$$T_e = T_1 \eta \frac{1 - \Gamma_1^2 - \varepsilon T / T_1}{1 - \Gamma_1^2 - \varepsilon} + T_a \gamma_a. \quad (29)$$

При  $T = T_1$  получим  $T_{e1} = T_1 + (T_a - T_1)\gamma_a$ , т.е., как и должно быть, совпадает с выражением (17). При неизменном поддумливании, определенном выше из условия  $n_{K3} = n_1$ , результаты замеров, выраженные в яркостной температуре, будут иметь вид

$$\begin{aligned} T_{Я1} &= [T_1 + (T_a - T_1)\gamma_a] (1 - \Gamma_1^2) + \Gamma_1^2 T_{e1}, \\ T_{Я2} &= [T_2 + (T_a - T_2)\gamma_a] (1 - \Gamma_2^2) + \Gamma_2^2 T_{e1}, \\ T_{Я3} &= [T_3 + (T_a - T_3)\gamma_a] (1 - \Gamma_3^2) + \Gamma_3^2 T_{e1}. \end{aligned} \quad (30)$$

Разлагая  $T_{e1}$  в (29) в ряд по  $\varepsilon$ , ограничиваясь линейным членом и подставляя в (30), получим после определения разностей  $T_{я}$  и подстановки в (3)

$$T_3 - T_1 = \frac{n_3 - n_1}{n_2 - n_1} \frac{1 - \Gamma_2^2}{1 - \Gamma_3^2} (T_2 - T_1) + \varepsilon \frac{\Gamma_3^2 - \Gamma_2^2}{1 - \Gamma_3^2} (T_1 - T). \quad (31)$$

Отсюда видно, что абсолютная ошибка измерения температуры составит  $\Delta T = \varepsilon (T_1 - T) \Gamma_3^2$ . При  $\varepsilon = 0,1$ ,  $\Gamma_3^2 = 0,1$  и  $T_1 - T = 15^\circ\text{C}$  это дает заметную величину  $\Delta T \approx 0,15^\circ\text{C}$ . Ошибка исчезает, если замыкание антенны производится телом при температуре  $T = T_1$ . В результате получаем, как и следует, выражение для  $T_3 - T_1$ , совпадающее с (7), (20):

$$T_3 - T_1 = \frac{n_3 - n_1}{n_2 - n_1} \frac{1 - \Gamma_2^2}{1 - \Gamma_3^2} (T_2 - T_1).$$

Таким образом, неполное отражение шумов при закорачивании антенны телом, имеющим температуру  $T = T_1$ , не приводит к какой-либо дополнительной погрешности.

Рассмотрим теперь измерение тоже для случая  $\Gamma^2 \neq 1$ , но когда подумливание  $T_e$  устанавливается при всех трех замерах. Аналогично (29) получим

$$\begin{aligned} T_{я1} &= \left[ T_1 + (T_a - T_1) \gamma_a \right] (1 - \Gamma_1^2) + \Gamma_1^2 T_{e1}, \\ T_{я2} &= \left[ T_2 + (T_a - T_2) \gamma_a \right] (1 - \Gamma_2^2) + \Gamma_2^2 T_{e2}, \\ T_{я3} &= \left[ T_3 + (T_a - T_3) \gamma_a \right] (1 - \Gamma_3^2) + \Gamma_3^2 T_{e3}, \end{aligned} \quad (31)$$

где значения эквивалентной температуры согласно (28) запишутся в виде

$$T_{e1} = T_i \eta \frac{1 - \Gamma_i^2 - \varepsilon T / T_i}{1 - \Gamma_1^2 - \varepsilon}. \quad (32)$$

Каждая из  $T_{ei}$  должна определяться по выходу короткого замыкания  $n_{к3}$  при температуре замыкающего тела  $T$ , равной по очереди  $T_1, T_2, T_3$ . Это дает  $T_{e1} = T_1 \eta + T_a \gamma_a$ ,  $T_{e2} = T_2 \eta + T_a \gamma_a$  и  $T_{e3} = T_3 \eta + T_a \gamma_a$ .

Подставляя в выражения (31) и используя (3), получим

$$T_3 - T_1 = \frac{n_3 - n_1}{n_2 - n_1} (T_2 - T_1) \quad (33)$$

- полное исключение ошибок несогласования. Однако мы не можем строго установить  $T_{e3}$ , т.к. нужно определять  $n_{k3}$  при замыкателе, имеющем температуру  $T_3$ , которая подлжет измерению. В связи с этим для третьего замера можно сохранить установку  $T_H$ , сделанную для опорного (первого) замера. Таким образом, получаем систему уравнений, аналогичную (31), (32), где в третьем уравнении формулы (31) вместо  $T_{e3}$  нужно поставить  $T_{e1} = T_1 \eta + T_a \chi_a$ . После разрешения уравнений получаем

$$\frac{n_3 - n_1}{n_2 - n_1} = \frac{T_3 - T_1}{T_2 - T_1} (1 - \Gamma_3^2). \quad (34)$$

Здесь полностью сохраняется ошибка несогласования с объектом. Если теперь  $T_{e3}$  установить из условия  $n_{k3} = n_3$ , но короткое замыкание осуществляется телом с температурой  $T_1$ , а не  $T_3$ , то, используя в третьем уравнении (31)  $T_{e3} = T_3 \eta (1 + \varepsilon - \varepsilon T_1 / T_3) + T_a \chi_a$ , можно получить

$$\frac{n_3 - n_1}{n_2 - n_1} (T_2 - T_1) = (T_3 - T_1) (1 - \varepsilon \Gamma_3^2). \quad (35)$$

Для исключения влияния несогласования при  $\Gamma_3^2 \leq 0,5$  нужно, чтобы величина  $\varepsilon \leq 0,05$ , тогда относительная ошибка будет 2,5%, что при  $T_3 - T_1 \approx 5^\circ$  даст абсолютную ошибку  $\sim 0,1^\circ\text{C}$ . Таким образом, рассмотренный способ измерений является приемлемым для приближения к идеальному.

Наконец, рассмотрим способ также для неполного закорачивания, но когда равновесное поддумливание устанавливается только для  $^\circ$  замера тела. При этом

$$\begin{aligned} T_{я1} &= [T_1 + (T_a - T_1) \chi_a] (1 - \Gamma_1^2) + T_{e3} \Gamma_1^2, \\ T_{я2} &= [T_2 + (T_a - T_2) \chi_a] (1 - \Gamma_2^2) + T_{e3} \Gamma_2^2, \\ T_{я3} &= [T_3 + (T_a - T_3) \chi_a] (1 - \Gamma_3^2) + T_{e3} \Gamma_3^2, \end{aligned} \quad (36)$$

$$T_{e3} = T_3 \eta \frac{1 - \Gamma_3^2 - \varepsilon T/T_3}{1 - \Gamma_3^2 - \varepsilon} + T_a \gamma_a.$$

Представим  $T_{e3}$ , пользуясь разложением в ряд по  $\Gamma_3 + \varepsilon$ . Ограничиваясь первыми членами, получим  $T_{e3} = T_3 \eta (1 - \varepsilon \frac{T_3 - T}{T_3}) + T_a \gamma_a$ . Находя калибровочную и измерительную разность, имеем

$$T_{я2} - T_{я1} = [T_2(1 - \Gamma_2^2) - T_1(1 - \Gamma_2^2)] + (\Gamma_2^2 - \Gamma_1^2)(T_3 + \varepsilon T_3 - T),$$

$$T_{я3} - T_{я1} = \eta (T_3 - T_1)(1 - \Gamma_1^2).$$

Устанавливая  $\Gamma_2^2 = \Gamma_1^2$ , получим согласно (3) с достаточной точностью

$$T_3 - T_1 = \frac{n_3 - n_1}{n_2 - n_1} (T_2 - T_1). \quad (37)$$

Таким образом, должной установкой  $\Gamma_1^2$  и  $\Gamma_2^2$  в этом случае исключается влияние несогласования антенны и неполного замыкания. Кроме того, исключается критичность в выборе температуры металла, которым закорачивается антенна. Практически в широких пределах величина  $T$  является произвольной, в том числе та, что получается при "замыкании" свободным пространством. Однако при всем этом нужно помнить, что достаточно точная установка равновесного подшумливания  $n_3 = n_{к3}$  возможна, как указывалось выше, для  $\Gamma^2 \leq 0,5$ , чему соответствует КСВН  $\sim 6$ .

Выше был рассмотрен метод установления равновесия шумов путем использования короткого замыкания антенны. Это оказывается не очень удобным, так как требует значительного времени и соответствующей аппаратуры (самописец), не необходимой для самих измерений. Кроме того, само замыкание антенны вызывает сомнения относительно стабильности параметров замыкания, которые могут меняться от неплотного касания с металлом. Если используется отражение при контакте со свободным пространством, то вносится неопределенность его фоновой температуры, что дает, как было видно из расчетов, существенную ошибку.

В связи с этим возникает предложение использовать для установки равновесного шума  $T_H$  заданное определенное периодическое изменение  $\Gamma^2$ . Это можно осуществить разными способами, о которых будет сказано позднее. Предположим, что  $\Gamma^2$  меняется синусоидально с амплитудой  $\Delta \Gamma^2$ . Согласно (14), если антенна соединена с телом температуры  $T_c$ , то на выходе возникнет периодическое колебание амплитудой

$$\Delta n = \kappa \Delta T_a + n_0, \quad \Delta T_a = - [T_i + (T_a - T_i) \gamma_a] \Delta \Gamma^2 + T_{ei} \Delta \Gamma^2. \quad (38)$$

Регулируя поддумливание, находим его значение при  $\Delta T_a = 0$ , что будет иметь место, как видно из (38), при

$$T_{ei} = T_i + (T_a - T_i) \gamma_a = \beta T_{H1} + a.$$

Отсюда находим  $T_{ei}$  для замеров  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$  и, исключая  $\beta$  и  $a$ , получаем

$$T_3 - T_1 = \frac{T_{H3} - T_{H1}}{T_{H2} - T_{H1}} (T_2 - T_1). \quad (40)$$

Таким образом, метод модуляции коэффициента отражения дает возможность полностью исключить его влияние. Некоторое близкое подобие этому способу было предложено и осуществлено А.В.Густовым. Осуществлялся подбор такого поддумливания, когда изменение  $\Gamma^2$  не сказывалось на выходном сигнале. При этом изменение  $\Gamma^2$  осуществлялось на некоторую величину путем установки между телом (или эталоном) и антенной диэлектрических пластинок с  $\epsilon = 5$  различной толщины. Очевидно, что равновесному поддумливанию соответствовала такая его величина, при которой выходной сигнал от помещения пластинок не менялся. Соответствующий вид записи указанной процедуры представлен на рис.6, где видно, что при температуре шумов поддумливания, равной 36, 40°C, изменение несогласования антенны от  $\Gamma^2 = 0,02$  (КСВ=1,3) до  $\Gamma^2 = 0,4$  (КСВ=4) не влияет на выход. В то же время поддумливание, соответствующее  $t = 37,2^\circ\text{C}$ , приводит к заметному изменению выхода около 0,4°C, что хорошо совпадает с теоретической оценкой:  $(37,2 - 36,4) : 0,4 = 0,32^\circ\text{C}$ .

## 2.1. Обсуждение результатов

Из приведенного анализа метода измерения, при котором поддумливание устанавливается, используя короткое замыкание антенны, видно, что для практически полного исключения влияния несогласования антенны с объектом измерения достаточно производить установку поддумливания для объекта, оставляя её неизменной для опорного и калибровочно-

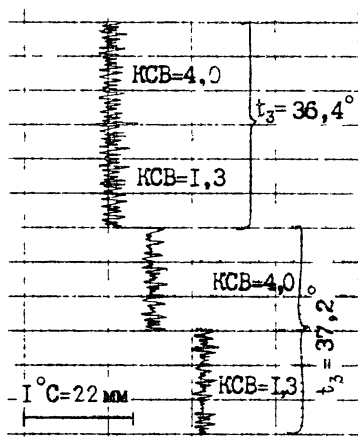


Рис. 6 Зависимость выхода радиотермометра при измерении температуры тела от степени согласования антенны. Для тела с температурой  $t_3 = 36,4^\circ\text{C}$ , равной температуре элементов схемы, имеет место полное тепловое равновесие, и несогласование антенны не влияет на результат измерений. При температуре тела  $t_3 = 37,2$  ошибка измерений составляет приблизительно  $0,4^\circ\text{C}$

го замеров (27). При этом неполное отражение шумов при замыкании антенны не вносит заметных ошибок (35), (37).

Сравнивая методы измерений при тепловом и нетепловом подшумливания, можно утверждать, что последний позволяет достичь существенно лучших результатов в исключении влияния несогласования при некоторых преимуществах в техническом отношении. Однако предложенные процедуры установления нетеплового подшумливания по объекту (короткое замыкание, изменение согласования и т.п.) требуют существенного увеличения времени измерений. Установка нетеплового подшумливания для опорного замера не требует увеличения времени измерений, но не дает преимуществ в исключении влияния несогласования (20) по сравнению со случаем теплового подшумливания, однако не навязывает жестких условий равенства и стабильности температуры всех входных элементов. В этом случае для установки компенсирующего подшумливания при опорном замере возможно использование периодической модуляции коэффициента отражения антенны, осуществляемой в самом эталоне. В следующей главе рассматривается несколько иное использование методов модуляции коэффициента отражения для измерений температуры.



### 3. НУЛЕВОЙ РАДИОТЕРМОМЕТР

В 1981 году нами был предложен метод измерения, полностью исключая влияние несогласования антенны с телом и эталонами. По существу он является некоторой модификацией метода, использующего изменение согласования с помощью короткого замыкания антенны, хотя хронологически рассмотрен был и испытан раньше. На рис. 7 приведена принципиальная схема входа нулевого измерителя. Здесь модулятор радиометра включен непосредственно после антенны и работает как замыкатель входа. Поддуливание осуществляется регулируемым генератором

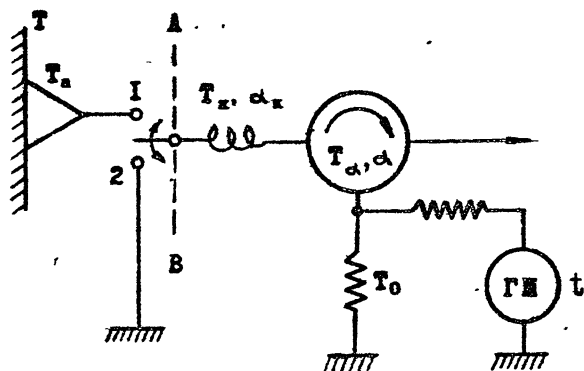


Рис. 7 Схема входной части нулевого радиотермометра при совмещении цепи поддуливания и опоры

шума с выходным сопротивлением, имеющим температуру  $T_0$ , и согласованном с импедансом антенны.

Заметим, что регулируемый шум может быть как нетепловой, так и тепловой. В последнем случае должна регулироваться температура сопротивления. Достоинством теплового источника шума является его эталонность - он строго определяется температурой, которая легко измеряется. Однако регулировка тепловых шумов довольно инерционна, и, пока не разработаны маломнерционные регулируемые источники теплового шума, использование тепловых шумов для регулирования шума неэффективно. Для пояснения принципа измерений предположим сначала идеальные условия, когда  $\alpha = \alpha_k = 0$ . Рассмотрим сигнал в сечении АВ для обоих положений модулятора: первое положение - при соединении входа с антенной, второе - при коротком замыкании входа.

Температурное выражение сигналов на входе для обоих положений модулятора будет

$$\begin{aligned} T_{\text{я}}^{(1)} &= [T_{\text{л}} + (T_{\text{а}} - T_{\text{л}}) \chi_{\text{а}}] (1 - \Gamma^2) + T_{\text{нл}} \Gamma^2, \\ T_{\text{я}}^{(2)} &= T_{\text{нл}} \Gamma_{\text{кз}}^2 + T (1 - \Gamma_{\text{кз}}^2). \end{aligned} \quad (41)$$

Здесь  $T$  - температура коротко замкнутой части модулятора, если мы рассматриваем механический модулятор, в котором нет нетепловых источников шума. Обычно, однако, используется электронный модулятор, где неизбежно существуют дополнительные нетепловые компоненты шума. В данном рассмотрении мы их не учитывали и, как показывает опыт, их влияние сколько-нибудь заметное еще не обнаружено. Требуется специальное исследование.

Сигнал на выходе радиометра будет пропорционален разности  $T_{\text{я}}^{(1)} - T_{\text{я}}^{(2)}$ . Изменяя величину подшумливания  $T_{\text{нл}}$ , можно добиться условий, когда шум  $T_{\text{я}}^{(1)}$  и  $T_{\text{я}}^{(2)}$  сравняется, и выход радиометра становится равным нулю. Положение нуля выхода должно быть определено заранее. Наиболее надежно он устанавливается при выключении только процесса модуляции.

Приравняв  $T_{\text{я}}^{(1)} = T_{\text{я}}^{(2)}$ , получим значение регулируемого шума  $T_{\text{нл}}$ :

$$T_{\text{л}} + (T_{\text{а}} - T_{\text{л}}) \chi_{\text{а}} = T_{\text{нл}} \frac{\Gamma_{\text{кз}}^2 - \Gamma^2}{1 - \Gamma^2} + T \frac{1 - \Gamma_{\text{кз}}^2}{1 - \Gamma^2}. \quad (42)$$

При  $\Gamma_{\text{кз}}^2 = 1$  коэффициенты отражения сокращаются, и значение сигнала с выхода антенны выражается только через  $T_{\text{нл}}$

$$T_{\text{л}} \eta + T_{\text{а}} \chi_{\text{а}} = T_{\text{нл}}. \quad (43)$$

При калиброванном источнике шума величина  $T_{\text{нл}}$  известна с заданной точностью. Далее, зная потери  $\chi_{\text{а}}$  в антенне и ее температуру, может быть найдена и измеряемая температура тела. Однако, как мы уже говорили выше, поправку на КПД и температуру антенны нельзя считать надежно определяемой величиной. Поэтому необходима внешняя калибровка, позволяющая исключить влияние потерь  $\chi_{\text{а}}$  и собственных шумов антенны  $T_{\text{а}} \chi_{\text{а}}$ . При этом для всех трех замеров будем иметь согласно (43)

$$T_1 \eta + T_a \gamma_a = T_{H1},$$

$$T_2 \eta + T_a \gamma_a = T_{H2}, \quad (44)$$

$$T_3 \eta + T_a \gamma_a = T_{H3},$$

откуда, исключая  $\eta$  и  $T_a \gamma_a$ , имеем

$$T_3 - T_1 = (T_2 - T_1) \frac{T_{H3} - T_{H1}}{T_{H2} - T_{H1}}. \quad (45)$$

Таким образом, рассмотренный метод при сделанных допущениях приводит к идеальным условиям измерений, когда полностью исключается влияние несогласования объекта с антенной. Нетрудно видеть, что здесь имеет место полная эквивалентность методу короткого замыкания антенны с той лишь разницей, что сравнение выходов сигналов с антенны ( $\Pi_i$  или  $T_{\gamma i}$ ) с сигналом при коротком замыкании ( $\Pi_{K3}$ ,  $T_{\gamma i}^{(2)}$ ) производится быстро с определенной частотой, благодаря чему равенство сигналов (т.е.  $\Pi_i = \Pi_{K3}$  или  $T_{\gamma i}^{(1)} = T_{\gamma i}^{(2)}$ ) устанавливается по нулю выхода радиометра. Здесь удачно сочетаются необходимость модуляции сигнала для радиометрического приёма с требованиями конкретных измерений. Другое, более тонкое и важное, различие состоит в том, что сравниваемые сигналы проходят через разные плечи модулятора, поэтому существенным становится их идентичность.

Так же, как и в рассмотренном в предыдущей главе случае, нужно помнить, что при  $\Gamma^2 \approx 1$  оба уравнения (41) совпадают, т.е. нет точки пересечения линейных зависимостей  $T_{\gamma i}^{(1)}$  и  $T_{\gamma i}^{(2)}$  от регулируемого  $T_H$ , и его значение не определяется.

Таким образом, чем больше  $\Gamma^2$ , тем более будет интервал значений  $T_{H1}$ , при котором отклонение выхода от нуля еще может быть замечено. Иначе говоря, ошибка в фиксации и измерении  $T_{H1}$ , дающем баланс, возрастает с увеличением несогласования  $\Gamma^2$ . При  $\Gamma^2 = 1$  нулевой выход сохранится при любых значениях  $T_H$ , и метод в этом случае не работает. Практически метод будет действителен при  $\Gamma^2 \leq 0,5$ .

Рассмотрим теперь реальную ситуацию, когда поглощение в циркуляторе и кабеле не равны нулю. При этом

$$T_{\gamma i}^{(1)} = [T_i + (T_a - T_i) \gamma_a] (1 - \Gamma_i^2) + [T_{H1} (1 - \alpha)(1 - \alpha_K) + T_a \alpha (1 - \alpha_K) + T_K \alpha_K] \Gamma_i^2,$$

$$T_{\gamma i}^{(2)} = [T_{H1} (1 - \alpha)(1 - \alpha_K) + T_a \alpha (1 - \alpha_K) + T_K \alpha_K] \Gamma_{K3}^2 + T (1 - \Gamma_{K3}^2). \quad (46)$$

Приравнивая оба выражения, получим, аналогично (42), более сложное выражение сигнала через  $T_H$  :

$$T_i + (T_a - T_i) \gamma_a = \left[ T_{H1} (1-d)(1-d_k) + T_K d(1-d_k) + T_K d_k \right] \frac{\Gamma_{K3}^2 - \Gamma_i^2}{1 - \Gamma_i^2} + T \frac{1 - \Gamma_{K3}^2}{1 - \Gamma_i^2}. \quad (47)$$

Опять при  $\Gamma_{K3}^2 = 1$  влияние несогласования исчезает, но определение температуры объекта  $T_i$  оказывается отягощенным дополнительно влиянием параметров входа  $d$ ,  $d_k$ ,  $T_a$ ,  $T_K$ . Процедура калибровки дает, аналогично (45), исключение влияния  $\eta$  и  $T_a \gamma_a$ , а также убирает неизменные члены, представляющие влияние циркулятора и кабеля, в результате получаем

$$T_3 - T_1 = (T_2 - T_1) \frac{T_{H3} - T_{H1}}{T_{H2} - T_{H1}}, \quad (48)$$

т.е. идеальный случай измерений.

В схеме рис. 7 модулятор помещен непосредственно после антенны, при этом, как мы видим, влияние циркулятора и кабеля на окончательный результат измерения отсутствует, если  $\Gamma_{K3}^2$  равно строго единице.

Однако технически удобнее модулятор включать после кабеля, идущего к антенне, т.е. непосредственно перед циркулятором в едином блоке с усилителем. С точки зрения требований точности измерений это включение нецелесообразно, т.к. кабель будет включаться односторонне только на прохождение измеряемого сигнала. Поэтому всякие случайные изменения его параметров во время измерений могут вносить непредвиденную ошибку. Действительно, сигнал для обоих положений модулятора при  $\Gamma_{K3}^2 = 1$  будет

$$T_g^{(1)} = \left[ T_i + (T_a - T_i) \gamma_a \right] (1 - \Gamma^2) + \left[ T_{H1} (1-d)(1-d_k) + T_K d(1-d_k) + T_K d_k \right] (1-d_k) \Gamma^2 + T_K d_k,$$

$$T_g^{(2)} = T_K d + T_{H1} (1-d).$$

Приравнивая оба выражения, получаем

$$T_i + (T_a - T_i) \gamma_a = (1 - \Gamma^2)^{-1} \left\{ T_{H1} (1-d) \left[ 1 - (1-d_k)^2 \Gamma^2 \right] + T_K d \left[ 1 - (1-d_k)^2 \Gamma^2 \right] - T_K d_k \left[ 1 - (1-d_k) \Gamma^2 \right] \right\} \quad (49)$$

Отсюда видно, что величина  $I - \Gamma^2$  не сокращается полностью, что приводит к дополнительному влиянию параметров схемы входа, которое при калибровке также сохранится через члены вида  $\alpha \Gamma^2$ ,  $\alpha_k \Gamma^2$  и т.п. Можно показать, что ошибка в определении  $T_3 - T_1$ , будет  $\sim 2T_1 \alpha_k \Gamma_3^2$ .

Займемся теперь рассмотрением условий измерения для схемы рис.7, когда  $\Gamma_{к3}^2 \neq I$ . Положим, как и ранее,  $\Gamma_{к3}^2 = I - \varepsilon$ , где  $\varepsilon \ll I$ . Сначала рассмотрим идеальный случай:  $\alpha = \alpha_k = 0$ . При этом

$$T_{яi}^{(1)} = [T_i \eta + T_a \gamma_a] (1 - \Gamma_i^2) + T_{ni} \Gamma_i^2,$$

$$T_{яi}^{(2)} = T_{ni} (1 - \varepsilon) + T \varepsilon.$$

Приравнявая, получаем

$$T_i \eta + T_a \gamma_a = T_{ni} - \frac{T_{ni} - T}{1 - \Gamma_i^2} \varepsilon.$$

Таким образом, в каждом замере величина  $T_i \eta + T_a \gamma_a$  будет определяться с абсолютной ошибкой около  $(T_{ni} - T) \varepsilon$ . Производя три замера и решая уравнения при условии, что  $\Gamma_1^2 = \Gamma_2^2$ , а также  $1/(1 - \Gamma_3^2) \approx 1 + \Gamma_3^2$ , получим, пренебрегая величинами третьего порядка малости,

$$(T_3 - T_1) \eta = (T_{н3} - T_{н1}) (1 - \varepsilon - \varepsilon \Gamma_3^2),$$

$$(T_2 - T_1) \eta = (T_{н2} - T_{н1}) (1 - \varepsilon).$$

При этом абсолютная ошибка определения разности  $T_3 - T_1$  будет около  $(T_3 - T_1) \varepsilon \Gamma_3^2$ , что примерно на порядок (на порядок  $\Gamma_3$ ) меньше ошибки каждого замера.

При  $\varepsilon = 0,05$ ,  $\Gamma_3^2 \leq 0,5$  абсолютная ошибка при обычных разностях  $T_3 - T_1 \approx \pm 5^\circ\text{C}$  составит около  $0,1^\circ\text{C}$ . Заметим, что здесь важную роль играют правильный выбор и поддержание температуры замыкателя. При этом, ввиду тождественности замыкателя обычным проводам подводки, трудно определить его границы и обеспечить их заданную температуру. В связи с этим желательно достичь симметрии в нагрузках плеч переключателя.

Проведем расчет для реальных условий схемы рис. 7, когда  $\alpha \neq \alpha_k \neq 0$ . Условие баланса дается выражением (47). Подставляя  $\Gamma_{к3}^2 = I - \varepsilon$ , запишем соотношения для трех замеров:

$$T_1 \eta_0 + T_a \gamma_a = \left[ T_{H1} (1-\alpha)(1-\alpha_k) + T_{\alpha} \alpha (1-\alpha_k) + T_k \alpha_k \right] \left( 1 - \frac{\varepsilon}{1-\Gamma_1^2} \right) + \frac{T\varepsilon}{1-\Gamma_1^2},$$

$$T_2 \eta_0 + T_a \gamma_a = \left[ T_{H2} (1-\alpha)(1-\alpha_k) + T_{\alpha} \alpha (1-\alpha_k) + T_k \alpha_k \right] \left( 1 - \frac{\varepsilon}{1-\Gamma_2^2} \right) + \frac{T\varepsilon}{1-\Gamma_2^2}, \quad (50)$$

$$T_3 \eta_0 + T_a \gamma_a = \left[ T_{H3} (1-\alpha)(1-\alpha_k) + T_{\alpha} \alpha (1-\alpha_k) + T_k \alpha_k \right] \left( 1 - \frac{\varepsilon}{1-\Gamma_3^2} \right) - \frac{T\varepsilon}{1-\Gamma_3^2}.$$

Положим, что  $\Gamma_1^2 = \Gamma_2^2 = 0$  и  $I/(I - \Gamma_3^2) \approx I + \Gamma_3^2$ , а также, учитывая  $\alpha, \alpha_k \ll I$ , после необходимых преобразований, пренебрегая величинами следующего порядка малости по сравнению с  $\varepsilon \Gamma_3^2$ , получим

$$(T_3 - T_1) \eta_0 = (T_{H3} - T_{H1}) (1-\alpha)(1-\alpha_k)(1-\varepsilon) - \varepsilon \Gamma_3^2 (T_{H3} - T), \quad (51)$$

$$(T_2 - T_1) \eta_0 = (T_{H2} - T_{H1}) (1-\alpha)(1-\alpha_k)(1-\varepsilon).$$

Влияние добавочных членов можно полностью исключить, если при измерениях каждый раз устанавливать  $\Gamma_3^2 = \Gamma_2^2 = \Gamma_1^2$ , тогда вместо (51) будем иметь

$$(T_3 - T_1) \eta_0 = (T_{H3} - T_{H1}) (1-\alpha)(1-\alpha_k) \left( 1 - \frac{\varepsilon}{1-\Gamma_3^2} \right),$$

$$(T_2 - T_1) \eta_0 = (T_{H2} - T_{H1}) (1-\alpha)(1-\alpha_k) \left( 1 - \frac{\varepsilon}{1-\Gamma_3^2} \right)$$

и все неизвестные исключаются:

$$T_3 - T_1 = (T_2 - T_1) \frac{T_{H3} - T_{H1}}{T_{H2} - T_{H1}}.$$

Однако осуществление такого измерения практически неприемлемо из-за затрат времени.

Из полученного выражения (51) видно, что неполное отражение приводит к некоторой зависимости измерений от несогласования антенны с объектом измерения. Это влияние тем слабее, чем меньше  $\varepsilon$ . Поправка составляет примерно величину  $\varepsilon \Gamma_3^2$ , которая при  $\varepsilon = 0,05$  и  $\Gamma_3^2 \leq 0,5$  составит максимально 2,5%, что при разности температур опоры и измеряемой примерно  $\pm 5^\circ\text{C}$  дает погрешность порядка  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ . Таким образом, если допустить отражение при замыкании не менее 95%

мощности, то изменение согласования антенны в пределах  $\Gamma_3^2 \leq 0,5$  не приводит к заметным ошибкам.

Заметим, что согласно (51) ошибка может быть еще снижена таким выбором температуры  $T$ , которая близка к средней температуре измеряемых тел  $\bar{T}_3$ . В этом, как видно, имеется почти полная аналогия с требованиями измерений при методе короткого замыкания антенны.

Оказывается, что рассмотренный выше специфический нулевой метод, приводящий к исключению влияния несогласованной антенны с объектом, был предложен еще в 1978 г. [6] и оставался долгое время незамеченным. Это, по-видимому, можно объяснить отсутствием в указанной работе достаточного теоретического обоснования и анализа. Интересным предложением в этой работе является исключение короткозамкнутого плеча модулятора.

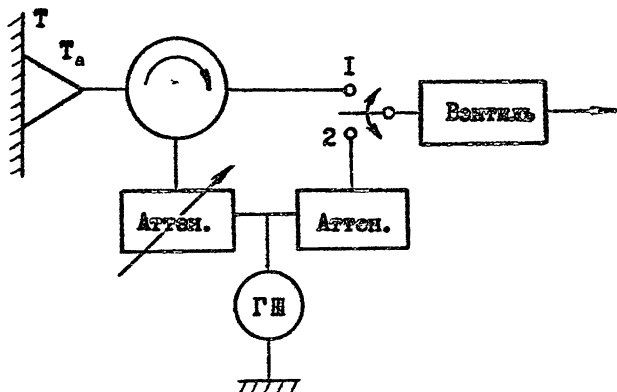


Рис. 8 Принципиальная схема входа нулевого радиотермометра при раздельных ветвях подшумливания и опоры

Предложенная схема приведена на рис. 8 без изменений. Особенностью её является то, что шумы, идущие в приёмник от антенны, при первом положении переключателя, и равные им шумы сравнения, идущие в приёмник минуя антенну, при втором положении переключателя, могут регулироваться независимо друг от друга.

Эта возможность, с одной стороны, позволяет исключить короткозамкнутую цепь, а, с другой, компенсировать ошибки из-за неизбежного неравенства коэффициентов передачи плеч модулятора. Используя эту идею, представим схему 7 в виде рис. 9.

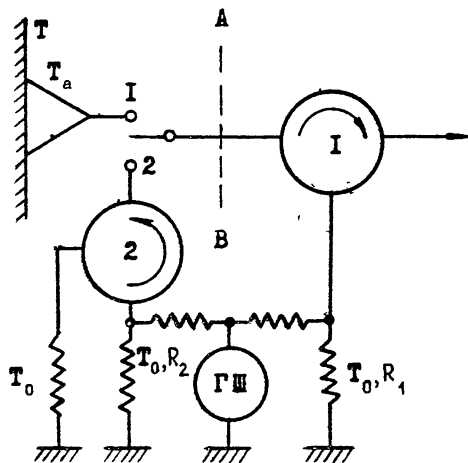


Рис. 9 Вариант схемы входа нулевого радиотермометра рис. 7 при раздельных цепях подшумливания и опоры

Предположим, что коэффициент передачи переключателя в обоих положениях разный. Соответствующие сигналы в сечении АВ запишутся

$$T_{я}^{(1)} = T_{ia} (1 - \Gamma^2) (1 - \varepsilon_1) + \left\{ [T_H^{(1)} (1 - \alpha) + T_a \alpha] (1 - \varepsilon_1) + T_S \varepsilon_1 \right\} (1 - \varepsilon_1) \Gamma^2 + T_S \varepsilon_1, \quad (53)$$

$$T_{я}^{(2)} = [T_H^{(2)} (1 - \alpha) + T_a \alpha] (1 - \varepsilon_2) + T_S \varepsilon_2.$$

Здесь  $T_{ia} = T_1 + (T_u - T_l) \gamma_a$  - температура шумов антенны,  $1 - \varepsilon_1$  - коэффициент передачи модулятора в первом положении,  $1 - \varepsilon_2$  - во втором,  $T_H^{(1)} = T_0 + \beta_1 t$  - регулируемое подшумливание антенны,  $T_H^{(2)} = T_0 + \beta_2 t$  - регулируемый эквивалент подшумливания во втором плече,  $T_S$  - эквивалентная температура шума модулятора, учитывающая его тепловые и дробовые шумы в случае переключателя на основе активных элементов. Регулируемые шумы состоят из тепловых шумов внутреннего сопротивления источника шума и неравновесных шумов электронного генератора шума. Тепловые шумы характеризуются температурой  $T_0$  внутреннего сопротивления, которое должно быть хорошо согласовано с циркулятором.

Добавочные шумы температуры  $t$  подаются на делители, обеспечивающие регулировку коэффициентов передачи  $\beta_1$  и  $\beta_2$  в первом и втором



плече соответственно.

Температура шумов генератора, подаваемых на делители, должна регулироваться и отсчитываться в абсолютных или относительных единицах по соответствующей шкале. Она должна быть достаточно высокой, чтобы можно было применить слабую связь генератора с цепями поддумливания, характеризуемую коэффициентами  $\beta_1 \ll 1$ ,  $\beta_2 \ll 1$ ; достаточно, если  $t \approx (10^2 - 5 \cdot 10^2) T_0$ .

В медицинских применениях радиотермометра величина поддумливания должна регулироваться в небольших пределах. Если  $T_0$  застabilизировано и соответствует комнатной температуре  $\sim 20^\circ\text{C}$ , т.е.  $T_0 = 293\text{ K}$ , то достаточно изменение  $T_n^{(1)}$  в пределах  $300 \leq T_n \leq 315$ , т.е. требуется изменение  $t$  всего в три раза.

Важным является хорошее согласование внутренних сопротивлений источников шума, т.е. нагрузок циркуляторов. Если, например, плохо согласована нагрузка  $R_1$  циркулятора "I", то шумы усилителя, отражаясь от нагрузки, попадают в антенну, что приводит к ошибкам измерений. Это замечание относится также ко всем предыдущим схемам. В схеме рис. 9 циркулятор 2 необходим, чтобы исключить попадание шумов от цепи поддумливания в цепь эквивалента при втором положении переключателя.

Приравняем оба выражения (53), получим условие баланса. Однако ввиду неполной идентичности плеч, нулевой выход будет получен не при том условии, когда поддумливание оказывается строго равным интенсивности сигнала, подходящего к поверхности раздела, как изображено на рис. 2.

Найдём разностный сигнал  $\Delta T = T_a^{(1)} - T_a^{(2)}$ :

$$\Delta T = \left\{ \left[ T_{ia}(1-\varepsilon_1) - \beta_2 t(1-\alpha)(1-\varepsilon_2) - T_0(1-\alpha) - T_a \alpha \right] + \theta(\Gamma^2, \alpha \varepsilon) \right\} (1-\Gamma^2). \quad (54)$$

При выводе этого выражения мы приняли, что составляющие переменного шума, зависящие от  $t$ , в обоих плечах должны меняться синхронно, т.е., что

$$\beta_2 t(1-\alpha)(1-\varepsilon_2) = \beta_1 t(1-\alpha)(1-\varepsilon_1)^2. \quad (55)$$

В противном случае возникают ошибки измерений из-за смещения баланса.

В ранее рассмотренных схемах, где поддумливание и балансные напряжения были строго одинаковыми, разностный сигнал был равен про-

извлечению  $(1 - \Gamma^2)$  на сумму шумов, не содержащую коэффициента отражения.

Поэтому требование баланса приводило к выражению, не содержащему  $\Gamma^2$ .

В рассматриваемом случае, благодаря в известной мере независимости состава шумов для поддумливания и баланса, выражение  $\Delta T$  содержит небольшое слагаемое шумов, зависящее от  $\Gamma^2$  и других параметров.

Вследствие этого условие баланса  $\Delta T = 0$  не соответствует строго условию равенства нулю выражения в квадратных скобках, а имеет вид

$$T_{2a}(1-\varepsilon_1) - \beta_2 t_i (1-\alpha)(1-\varepsilon_2) - T_a(1-\alpha) - T_a \alpha = \theta(\Gamma^2, \alpha, \varepsilon). \quad (56)$$

Произведя далее три замера и находя разности, получаем

$$(T_3 - T_1) \eta (1 - \varepsilon_1) = (t_3 - t_1) \beta_2 (1 - \alpha)(1 - \varepsilon_2) + \theta(\Gamma_3^2) - \theta(\Gamma_1^2), \quad (57)$$

$$(T_2 - T_1) \eta (1 - \varepsilon_1) = (t_2 - t_1) \beta_2 (1 - \alpha)(1 - \varepsilon_2) + \theta(\Gamma_2^2) - \theta(\Gamma_1^2).$$

Для рассматриваемой схемы величина  $\theta$  имеет довольно громоздкий вид:

$$\theta = \frac{1}{1 - \Gamma^2} \left\{ (T_0 - T_{0a} + T_a \alpha + 2T_S) \varepsilon_2 + T_S \varepsilon_1 + \varepsilon_1 \Gamma^2 (T_S - 2T_0 + 2T_0 \alpha - 2T_a \alpha) \right\}. \quad (58)$$

Как видно из этого выражения, все величины шумов здесь имеют порядок малости  $\varepsilon$  и  $\alpha$ .

Далее мы полагаем, что в схеме все элементы входа стабилизируются на одной и той же температуре, т.е.  $T_0 = T_a$ . Шумы электронного модулятора, характеризуемые эффективной температурой  $T_S$ , в общем случае равны  $T_S = T_0 + t_S$ , где  $T_0$  - тепловая часть шумов, а  $t_S$  - избыточная дробовая. Величина  $t_S$  в настоящее время не исследована. После этих замечаний получаем

$$\theta = \varepsilon_1 T_0 + \frac{\varepsilon_1 t_S (1 + \Gamma^2)}{1 - \Gamma^2} - \frac{\varepsilon_2 (T_0 + 2t_S)}{1 - \Gamma^2}.$$

Сделаем оценку ошибки в измерениях, полагая идеальный случай  $t_S = 0$  (механический переключатель). Полагаем  $1/(1 - \Gamma^2) \approx 1 + \Gamma^2$ , что достаточно точно при  $\Gamma^2 \leq 0,4$ , тогда

$$\theta = \varepsilon T_0 - \varepsilon_2 T_0 - \Gamma^2 \varepsilon_2 T_0. \quad (59)$$

Часть этих шумов, независимая от  $\Gamma^2$ , как видно из (57), не будет влиять на результат измерения разностей. Ошибка будет определяться только членом  $\theta$ , зависящим от  $\Gamma^2$ . Эта погрешность составит  $\sim \Gamma_3^2 \varepsilon_2 T_0$ , что даже при малом  $\varepsilon_2 \sim 10^{-2}$  и  $\Gamma_3^2 = 0,4$  даёт ощутимую ошибку  $\sim 1,2^\circ\text{C}$ .

В качестве резюме к рассмотрению этой схемы можно сделать вывод, что при использовании цепей поддумливания и баланса, различающихся по источникам шумов, вносится ошибка из-за неидентичности коэффициентов передачи переключателя.

Необходимо, чтобы обе цепи - антенная и балансная - были бы идентичны. В этом смысле более подходит схема рис. 10, представляющая определённую конкретизацию схемы рис. 8, предложенной в [6].

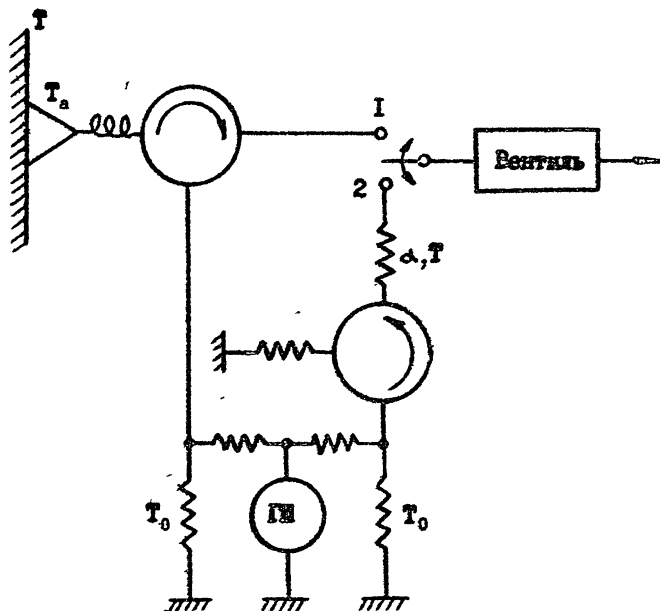


Рис. 10 Реальная схема входа нулевого радиотермометра с раздельными цепями поддумливания и опоры

Здесь для большей степени симметрии введено поглощение, равное потерям  $\alpha$  в циркуляторе.

Запишем шум:

$$\begin{aligned} T_{\text{я}}^{(1)} &= T_{\text{ид}}(1-\alpha)(1-\varepsilon_1)(1-\Gamma^2) + T_{\text{н}}^{(1)}(1-\alpha)^2(1-\varepsilon_1)\Gamma^2 + \\ &+ T_{\alpha}\alpha(1-\alpha)(1-\varepsilon_1)\Gamma^2 + T_{\alpha}\alpha(1-\varepsilon_1) + T_{\text{с}}\varepsilon_1, \\ T_{\text{я}}^{(2)} &= T_{\text{н}}^{(2)}(1-\alpha)^2(1-\varepsilon_2) + T_{\alpha}\alpha(1-\alpha)(1-\varepsilon_2) + T_{\alpha}\alpha(1-\varepsilon_2) + T_{\text{с}}\varepsilon_2. \end{aligned}$$

Разностный сигнал равен

$$\Delta T = [T_{2a}(1-\alpha)(1-\varepsilon_1) - T_0(1-\alpha)^2 - \beta_2 t(1-\alpha)^2(1-\varepsilon_2) - T_{\alpha}\alpha(1-\alpha)](1-\Gamma^2) + \theta(\Gamma^2), \quad (60)$$

$$\theta = \left\{ [T_0 - \alpha(2T_0 - T_{\alpha}) + \alpha^2(T_0 - T_{\alpha})](\varepsilon_2 - \varepsilon_1\Gamma^2) + (T_{\alpha}\alpha - T_{\text{с}})(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \right\}.$$

Причём,

$$\beta_2(1-\alpha)^2(1-\varepsilon_2) = \beta_1(1-\alpha)^2(1-\varepsilon_1). \quad (61)$$

Отсюда видно, что при равенстве  $\varepsilon_2 = \varepsilon_1$  (например, с точностью до единицы второго знака после запятой) величина  $\theta$  практически не зависит от  $\Gamma^2$ , и ошибка исчезает. При  $\varepsilon_2 \neq \varepsilon_1$ , но при  $T_0 = T_{\alpha}$  и  $T_{\text{с}} = T_0 + t_{\text{с}}$  получаем

$$\theta = \varepsilon_1 T_0 (1-\alpha) - \frac{t_{\text{с}}(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{1-\Gamma^2} \approx \varepsilon_1 T_0 (1-\alpha) + t_{\text{с}}(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)\Gamma^2. \quad (62)$$

Ошибку вносит второй член (62). При механическом переключателе  $t_{\text{с}} = 0$ , и ошибка исчезнет даже, если  $\varepsilon_2 \neq \varepsilon_1$ . При электронном модуляторе нужно добиваться равенства коэффициентов передачи плеч  $\varepsilon_2 = \varepsilon_1$  и снижения дополнительных шумов  $t_{\text{с}}$  до уровня  $\leq 0,1 T_0$ . Тогда при  $\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \approx 10^{-2}$  и  $\Gamma^2 = 0,5$  ошибка  $t_{\text{с}}(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)\Gamma^2 = 0,15^\circ\text{C}$ . Таким образом, схема рис. 10 более приемлема. Приравнивая разностный сигнал в (60) нулю и проведя обычные вычисления, получаем при сделанных предположениях

$$T_3 - T_1 = (T_2 - T_1) \frac{t_3 - t_1}{t_2 - t_1}.$$

Как видно из выражений (55), (61), коэффициенты передачи  $\beta_1$  и  $\beta_2$  должны быть связаны определенным соотношением, которое необходимо обеспечить предварительной регулировкой схемы.

Одним из очевидных способов установки этих соотношений является использование короткого замыкания антенны, когда вместо неё ставится замыкатель. При этом, как видно из (54), (58), (60), при  $\Gamma^2 = -1$ , образуется разностный сигнал, равный нулю. Регулировкой  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  нужно добиться такого положения, при котором изменение  $\Gamma$  не изменяет выходной сигнал. Это будет означать, что имеют место равенства (55), (61).

Нужно заметить, что при таком способе начальной установки могут возникнуть ошибки из-за неидеального замыкания цепи антенны. Однако здесь условия замыкания могут быть существенно лучше обеспечены, так как делаются однажды при регулировке прибора.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведённый анализ различных методов, методик и схем измерений внутренней температуры тел относится, главным образом, к измерениям температуры в интервале 30 - 45°C, что требуется для медико-биологических применений.

Измерения предложенным методом в других температурных интервалах могут потребовать несколько иных параметров схем. Однако разработанный метод расчета и анализа схем измерений позволит провести необходимое исследование схем в различных случаях практического применения контактного метода измерения внутренней температуры тел.

Для медико-биологических измерений, видимо, наиболее подходящим является балансный нулевой радиотермометр с автоматической установкой баланса. При этом, вероятно, технически более совершенной схемой является схема рис. 10, где возможные неравновесные шумы модулятора не попадают в антенну в противоположность тому, что может иметь место в схеме рис. 9. В случае, если шуми переключателя существенны, это может привести к ошибкам, так как отраженные от антенны шумы будут зависеть от её согласования. Все это должно быть еще тщательно исследовано экспериментально.

Сравнивая балансный радиотермометр с рассмотренным в первых двух главах терморавновесным, следует отметить, что в метрологическом отношении последний имеет преимущество перед балансным в том, что все

сигналы идут по одному плечу модулятора. Второе плечо не содержит изменяющихся сигналов и является только источником неизменного опорного шума. В балансном радиотермометре информативные сигналы проходят через каждое из плеч модулятора, что требует обеспечения большей степени симметрий модулятора.

Для работы балансной схемы необходимо создание источника шума с малоинерционной регулировкой его интенсивности, причём должен быть обеспечен точный отсчет интенсивности шума в абсолютных или относительных величинах. Пока такого технически приемлемого источника нет, нет также модулятора-замыкателя, который обеспечивал бы практически полное отражение сигнала при замыкании. Все эти проблемы могут быть решены существующей техникой, что позволит иметь наиболее совершенный радиотермометр.

Другой вопрос, который может возникнуть, состоит в том, что будет измеряться, если температура тела неоднородна в глубину. В этом случае температура шумов антенны при контакте с объектом равна

$$\tilde{T}_3(x) = \int_0^{\infty} T_3(x) \kappa(x, \lambda) dx,$$

где  $T_3(x)$  - кинетическая (истинная) температура в зависимости от глубины  $x$ ,  $\kappa(x, \lambda)$  - некоторая функция, экспоненциально убывающая в глубину, зависящая от длины волны, структуры и свойств тканей. На выходе антенны полный сигнал будет  $T_{\text{га}} = \tilde{T}_3(x) (1 - \Gamma^2) + T_{\text{га}} \Gamma^2$ , где  $\Gamma^2$  будет зависеть от структуры и свойств тканей. Таким образом, вместо  $T_3$  в случае однородно нагретого тела измеряется некоторое среднее значение температуры в глубине, равное  $\tilde{T}_3(x)$ . Детально для различных структур тканей этот вопрос рассмотрен в работе [8].

### Л и т е р а т у р а

1. Enander B., Larson G. Microwave Radiometric Measurements of the Temperature Inside a Body. - Electronics Letters, 1974, v.10, N 15, p.317.
2. Barrett A.H., Myers P.C. Subcutaneous Temperatures: A Method of Noninvasive Sensing. - Science, 1975, v.190, N 4215, p.669.

3. Троицкий В.С., Арантюрэев Б.А., Абрамов В.П. и др. О возможности использования собственного теплового радионизлучения тела человека для измерения температуры его внутренних органов. Препринт НИРФИ № 131. Горький 1979.
4. Троицкий В.С., Густов А.В., Белов И.Ф. и др. О возможности использования собственного теплового радионизлучения тела человека для измерения температуры его внутренних органов: результаты и перспективы. - Успехи физ. наук, 1981, т. 134, в. 1, с. 155.
5. Троицкий В.С. К теории контактных радиометрических измерений внутренней температуры тел. - Изв. вузов - Радиофизика, 1981, т. 24, № 9, с. 1054.
6. Ludeke K.M., Schick B., Konler J. Radiation Balance Microwave Thermograph for Industrial and Medical Applications. - Electronics Letters, 1978, v.14, № 6, p.194.
7. Рахлин В.Л. Метод регулируемого поддумливания для исключения ошибок радиотермометра, вызванных рассогласованием антенны с телом. - Изв. вузов - Радиофизика, 1984, т. 27, № 9.
8. Троицкий В.С., Густов А.В. и др. Измерение глубинного температурного профиля биобъектов по их собственному тепловому радионизлучению. - Изв. вузов - Радиофизика (в печати).

Дата поступления статьи  
11 октября 1984 г.