

Совлуков А.С.
д.т.н., проф., г.н.с.
Лаборатория № 2

**РАДИОВОЛНОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ
НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН:
МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ
ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДАТЧИКОВ
И ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ**

Электромагнитные волны

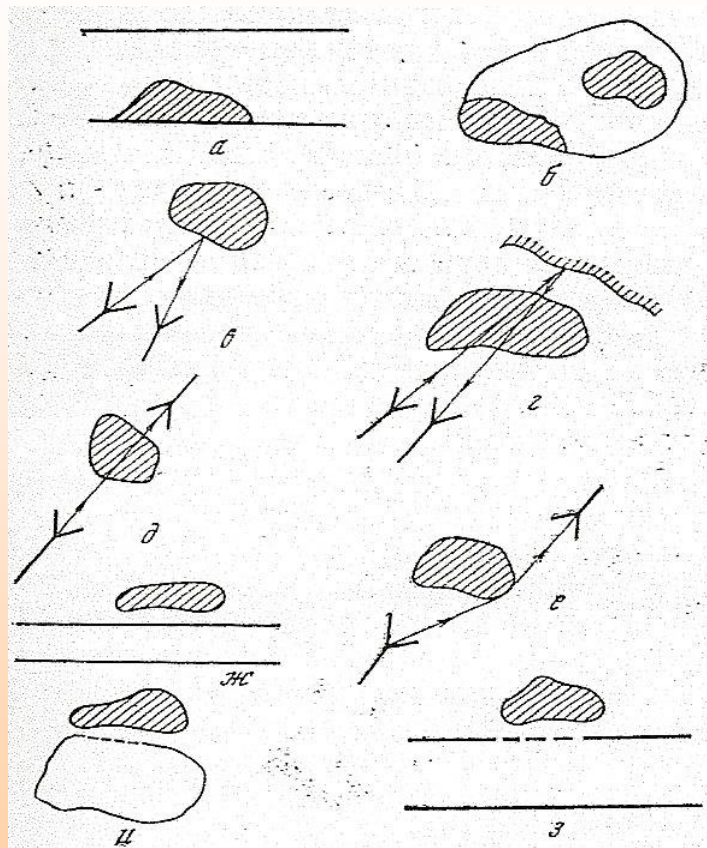


$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad c = 3 \cdot 10^8 \text{ М/с}$$

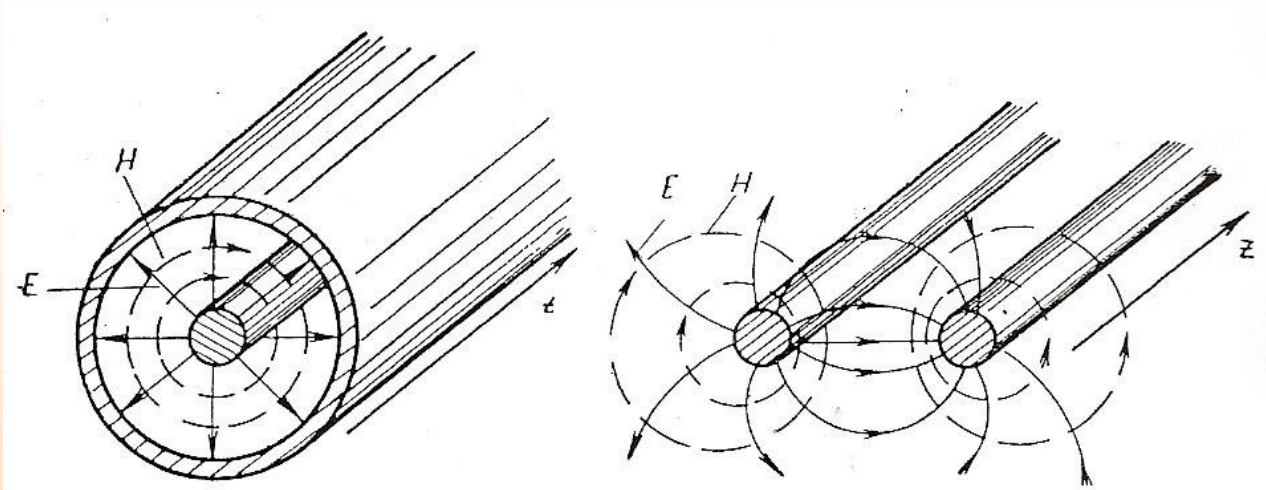
Основные ВЧ- и СВЧ-элементы для реализации радиоволновых датчиков

В ВЧ-диапазоне частот: отрезки длинных линий (~1 ÷ 300 МГц) (коаксиальной, двухпроводной и др.)

В СВЧ-диапазоне частот: полые волноводы, полые резонаторы, антенны (~1 ÷ 50 ГГц)



Основные виды взаимодействия высокочастотных электромагнитных полей с контролируемыми объектами.



a

б

Длинная линия:

a – коаксиальная; *б* – двухпроводная.

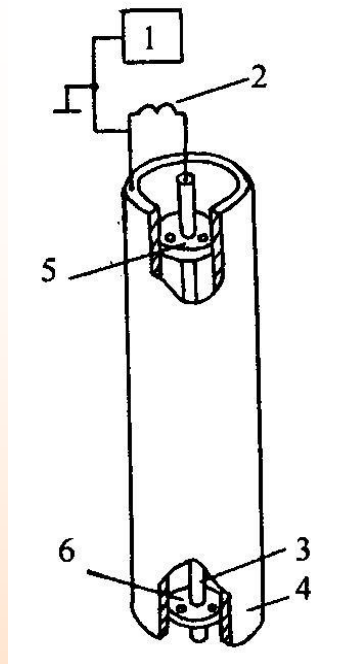


Схема с радиочастотным чувствительным элементом
1 – автогенератор, *2* – индуктивность, *3* – внутренний проводник,
4 – металлическая труба, *5* и *6* – диэлектрические опоры



Радиочастотный датчик

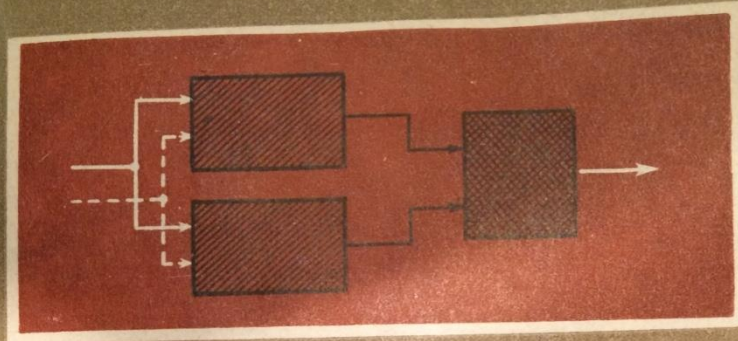
РАДИОВОЛНОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

1. Измерение геометрических параметров.
 - 1.1. Измерение толщины материалов, изделий, покрытий.
 - 1.2. Измерений диаметра изделий.
 - 1.3. Измерение длины протяженных изделий.
2. Измерение механических величин.
 - 2.1. Измерение уровня и положения границы раздела веществ в емкостях.
 - 2.2. Измерение количества вещества, произвольно распределенного по объему емкости.
 - 2.3. Измерение давлений, усилий и деформаций.
3. Измерение параметров движения.
 - 3.1. Измерение линейной скорости.
 - 3.2. Измерение скорости потока и расхода.
 - 3.3. Измерение частоты вращения.
 - 3.4. Измерение вибраций.
 - 3.5. Измерение ускорения.
4. Измерение физических свойств материалов и изделий.
 - 4.1. Измерение влажности, концентрации смеси веществ.
 - 4.2. Измерение физических свойств перемещаемых веществ.
5. Измерение и контроль параметров некоторых объектов и процессов.
 - 5.1. Сигнализация наличия, счет и идентификация объектов.
 - 5.2. Диагностика двигателей внутреннего сгорания.
 - 5.3. Обнаружение и локализация утечек в трубопроводах.
 - 5.4. Определение волокон в бумаге и лесоматериалах.
 - 5.5. Измерение температуры.



ВИКТОРОВ Владимир Андреевич
(1933-2018)

академик РАН, Лауреат Государственной премии СССР,
заслуженный деятель науки России, доктор технических наук,
профессор, основатель и первый заведующий лабораторией № 48
Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН



Б.Н.ПЕТРОВ, В.А.ВИКТОРОВ
Б.В.ЛУНКИН, А.С.СОВЛУКОВ

ПРИНЦИП ИНВАРИАНТНОСТИ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

Петров Б.Н., Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С. Принцип инвариантности в измерительной технике. М.: Наука. 1976. 244 с.

Монографии

1. Петров Б.Н., Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С. Принцип инвариантности в измерительной технике. М.: Наука. 1976. 244 с.
2. Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С. Высокочастотный метод измерения неэлектрических величин. М.: Наука. 1978. 280 с.
3. Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов. М.: Энергоатомиздат. 1989. 208 с.
4. Electromagnetic Aquametry. Ed. by Kupfer K. (Chapter 8.: Sovlukov A.S. Microwave and RF Resonator-Based Aquametry. P. 169-191). Springer Publ. 2005. 529 p.
5. Совлуков А.С. Радиоволновые методы влагометрии в технологических процессах / Мурманск, изд-во МГТУ. 2008. 77 с.
6. Датчики: Справочное пособие / Шарапов В.М., Полищук Е.С., Ишанин Г.Г., Гуржий А.Н., Викулин И.М., Гордеев Б.Н., Жуков Ю.Д., Кошевой Н.Д., Курмашев Ш.Д., Куценко А.Н., Марченко С.В., Минаев И.Г., Совлуков А.С./ Под. ред. В.М. Шарапова и Е.С. Полищука. – Черкассы, изд-во “Брама-Украина”. 2008. 1072 с.
7. Совлуков А.С. Радиоволновые методы измерения параметров технологических процессов. Учебное пособие для Вузов. Мурманск, изд-во МГТУ. 2009. 166 с.
8. Зубков М.В., Локтюхин В.Н., Совлуков А.С. Датчики и измерительные преобразователи для контроля окружающей среды. Учебное пособие для Вузов. Рязань, изд-во РГРУ. 2009. 64 с.
9. Датчики: Справочное пособие/ Шарапов В.М., Полищук Е.С., Кошевой Н.Д., Ишанин Г.Г., Минаев И.Г., Совлуков А.С./ М.: Техносфера, 2012. 624 с.

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДАТЧИКОВ И ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ: НОВЫЕ РЕШЕНИЯ

1. Датчики с управляемой функцией преобразования.

- 1.1. Функции преобразования датчиков с параметрами, управляемыми измеряемой/выходной величиной.
- 1.2. Функции преобразования датчиков с параметрами, управляемыми измеряемой/выходной величиной и возмущающим фактором.
- 1.3. Стабилизация функции преобразования датчика.
- 1.4. Схемы с двумя и более измерительными каналами.
- 1.5. Примеры. Радиоволновые датчики с управляемыми параметрами.

2. Многозондовые датчики.

- 2.1. Принципы построения многозондовых датчиков.
- 2.2. Инвариантные измерительные устройства с многозондовыми датчиками.
- 2.3. Примеры. Многозондовые радиоволновые датчики.

ЗАВИСИМОСТЬ ФУНКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДАТЧИКА ОТ ИЗМЕРЯЕМОЙ ВЕЛИЧИНЫ

При неизменной функции преобразования f датчика функциональная связь выходной величины y от измеряемой величины x выражается следующим соотношением:

$$y = f(x, a) \quad (1)$$

$$S_0 = \frac{dy}{dx} \quad (2)$$

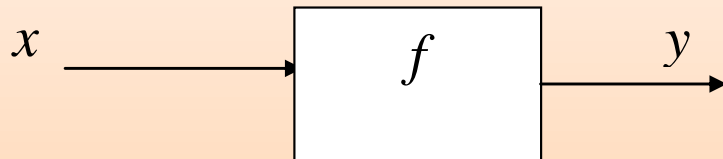


Рис.1

Если же коэффициент a является функцией входной (измеряемой) величины x , то есть $a = a(x)$, то

$$y = f(x, a(x)) \quad (3)$$

$$S = \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial a} \frac{\partial a}{\partial x} = S_0 + \Delta S_x \quad (4)$$

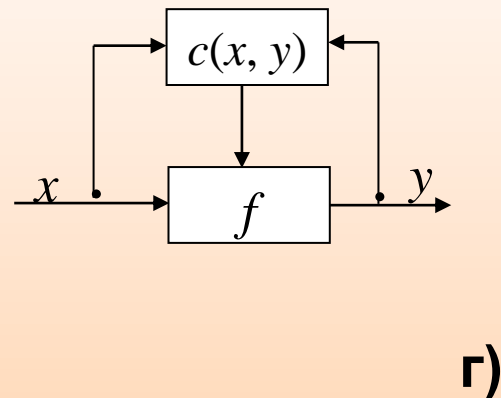
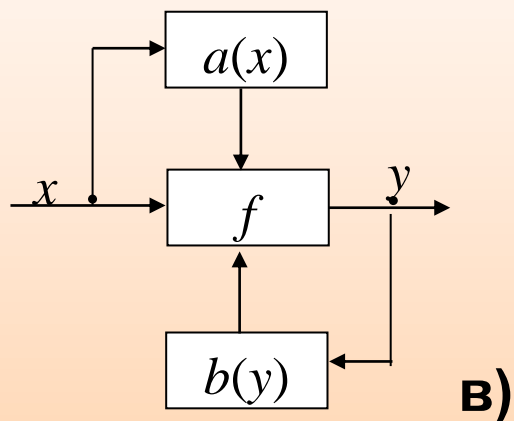
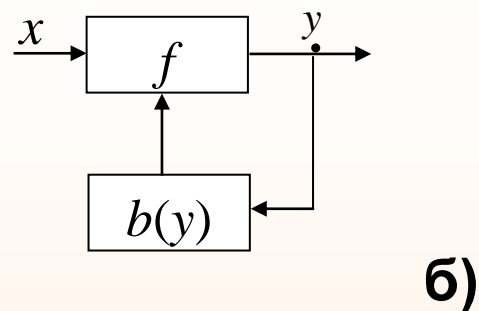
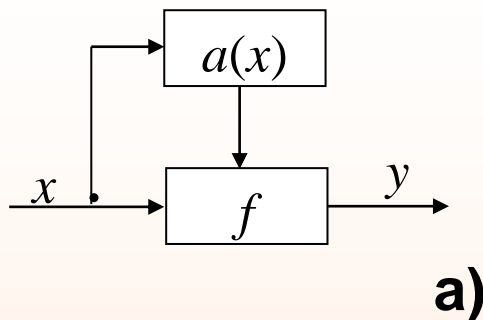
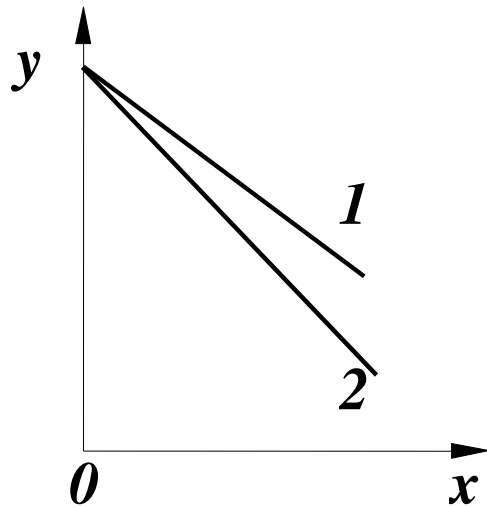
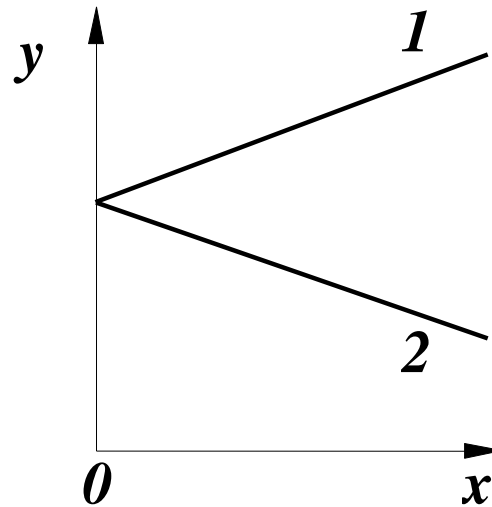


Рис.2. Схемы воздействия измеряемой и/или выходной величин на функцию преобразования датчика



a)



b)

Рис. 3. Выходные характеристики датчиков с управляемыми параметрами

Если функция преобразования датчика изменяется под воздействием выходной величины y , то

$$y = f(x, b(y)) \quad (5)$$

Соответственно, чувствительность S датчика в этом случае есть

$$S = \frac{\frac{\partial f}{\partial x}}{1 - \frac{\partial f}{\partial b} \frac{\partial b}{\partial y}} = \frac{S_0}{1 - \Delta S_y} \quad (6)$$

Из (6) следует, что $|S| > |S_0|$, если $0 < \Delta S_y < 1$. Знаки S и S_0 здесь одинаковые. Из (6) также следует, что чувствительность изменяется, если $\Delta S_y > 1$. Если же $1 < \Delta S_y < 2$, то $|S| > |S_0|$. Знаки S и S_0 здесь противоположные. Схема воздействия x и y для этого случая показана на Рис.2,б .

На Рис.2,в и Рис.2,г приведены схемы, соответствующие зависимостям

$$y = f(x, a(x), b(y)) \quad (7)$$

$$y = f(x, c(x, y)) \quad (8)$$

ЗАВИСИМОСТЬ ФУНКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДАТЧИКА ОТ ИЗМЕРЯЕМОЙ/ВЫХОДНОЙ ВЕЛИЧИНЫ И ВОЗМУЩАЮЩЕГО ФАКТОРА

$$y = f(x, \varepsilon, a)$$

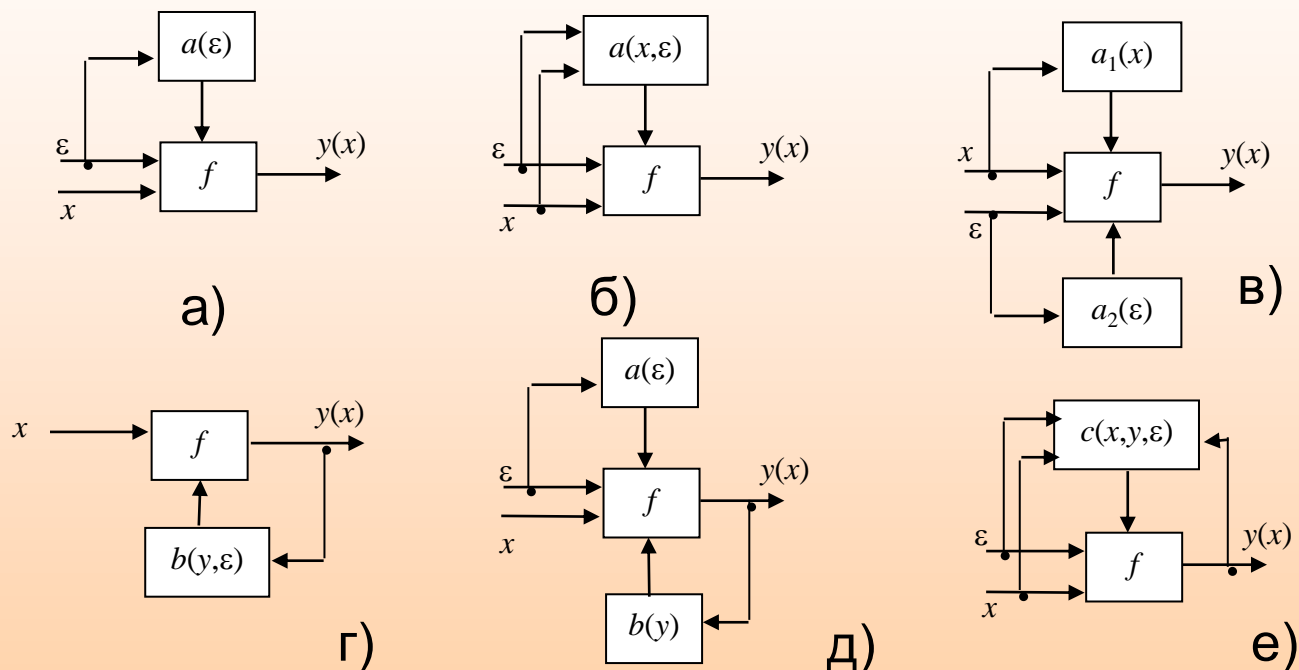


Рис. 4. Схемы воздействий измеряемой, выходной величин и возмущения на ФП датчика

СТАБИЛИЗАЦИЯ ФУНКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДАТЧИКА

Если параметры датчика изменяются под воздействием ε или как ε , так и x , то его функция преобразования может быть представлена следующими соотношениями:

$$y = f(x, \varepsilon, a(\varepsilon)) \quad (9)$$

$$y = f(x, \varepsilon, a(x, \varepsilon)) \quad (10)$$

$$y = f(x, \varepsilon, a_1(x), a_2(x)) \quad (11)$$

Из соотношения (9) следует:

$$\Delta y = \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial \varepsilon} \Delta \varepsilon + \frac{\partial f}{\partial a} \frac{\partial a}{\partial \varepsilon} \Delta \varepsilon = S_x \Delta x + (S_\varepsilon + \Delta S_\varepsilon) \Delta \varepsilon \quad (12)$$

Из соотношения (10) может быть получено:

$$\Delta y = \left(\frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial a} \frac{\partial a}{\partial x} \right) \Delta x + \left(\frac{\partial f}{\partial \varepsilon} + \frac{\partial f}{\partial a} \frac{\partial a}{\partial \varepsilon} \right) \Delta \varepsilon = (S_x + \Delta S_x) \Delta x + (S_\varepsilon + \Delta S_\varepsilon) \Delta \varepsilon \quad (13)$$

Для формулы (11) соотношение связи Δy с Δx и $\Delta \varepsilon$ аналогично (13).

Стабилизация функции преобразования датчика, то есть её независимость от влияющего возмущения ε , достигается при выполнении следующего условия:

$$S_\varepsilon + \Delta S_\varepsilon = 0 \quad (14)$$

Условие (14) также справедливо, если параметры датчика управляются выходной величиной Y . Этому соответствует соотношение

$$y = f(x, \varepsilon, b(y, \varepsilon)) \quad (15)$$

Тогда

$$\Delta y = \frac{\frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \left(\frac{\partial f}{\partial \varepsilon} + \frac{\partial f}{\partial b} \frac{\partial b}{\partial \varepsilon} \right) \Delta \varepsilon}{1 - \frac{\partial f}{\partial b} \frac{\partial b}{\partial y}} = \frac{S_x \Delta x + (S_\varepsilon + \Delta S_\varepsilon) \Delta \varepsilon}{1 - \Delta S_y}, \quad (16)$$

Соотношение (16) справедливо также для аналогичных формул

$$y = f(x, \varepsilon, a(\varepsilon), b(y)) \quad (17)$$

$$y = f(x, \varepsilon, c(x, y, \varepsilon)) \quad (18)$$

Схемы воздействий на рис. 4,г; 4,д; 4,е соответствуют формулам (15), (17), (18).

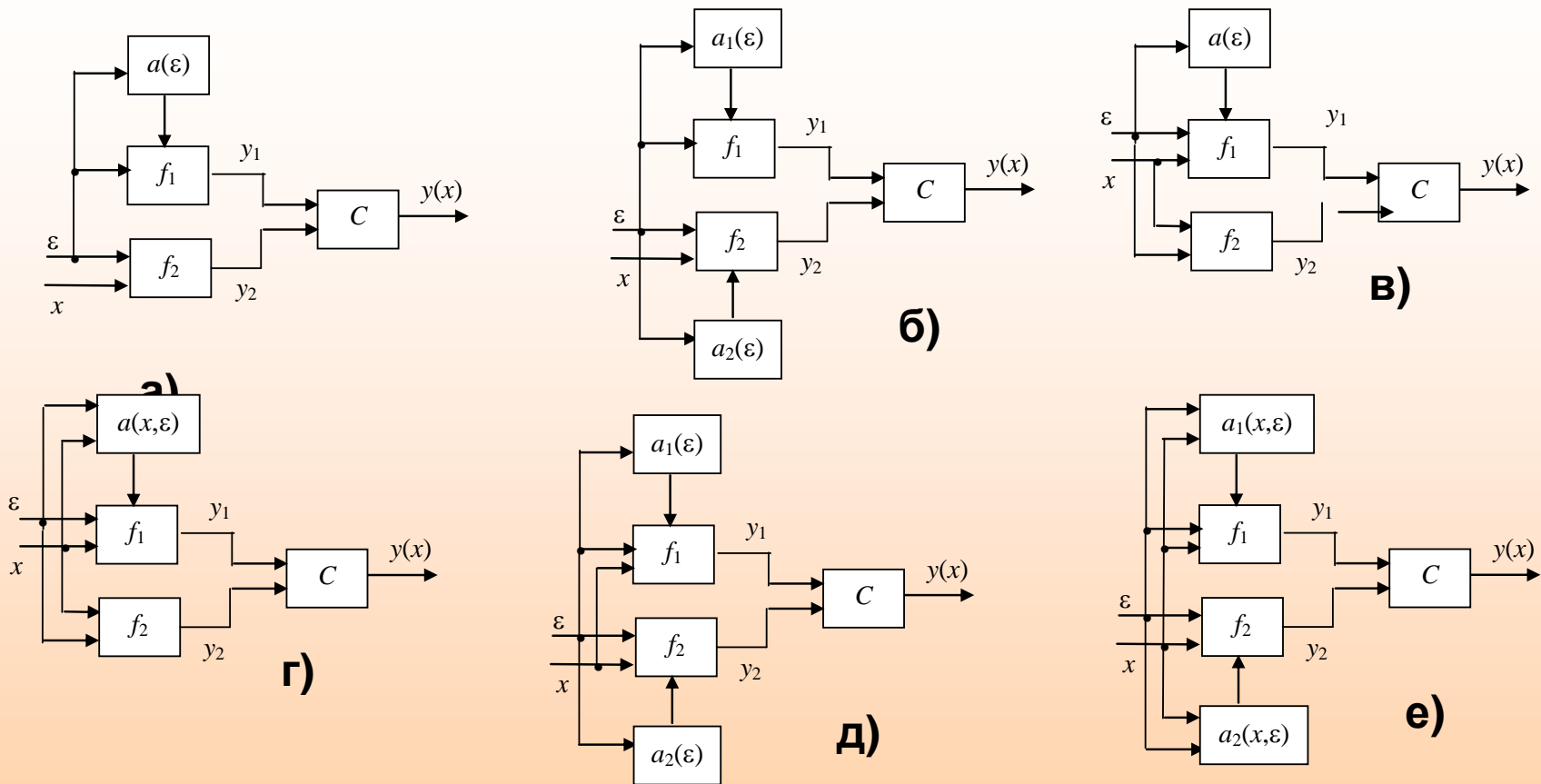


Рис.5. Структурные схемы разомкнутых инвариантных измерительных устройств

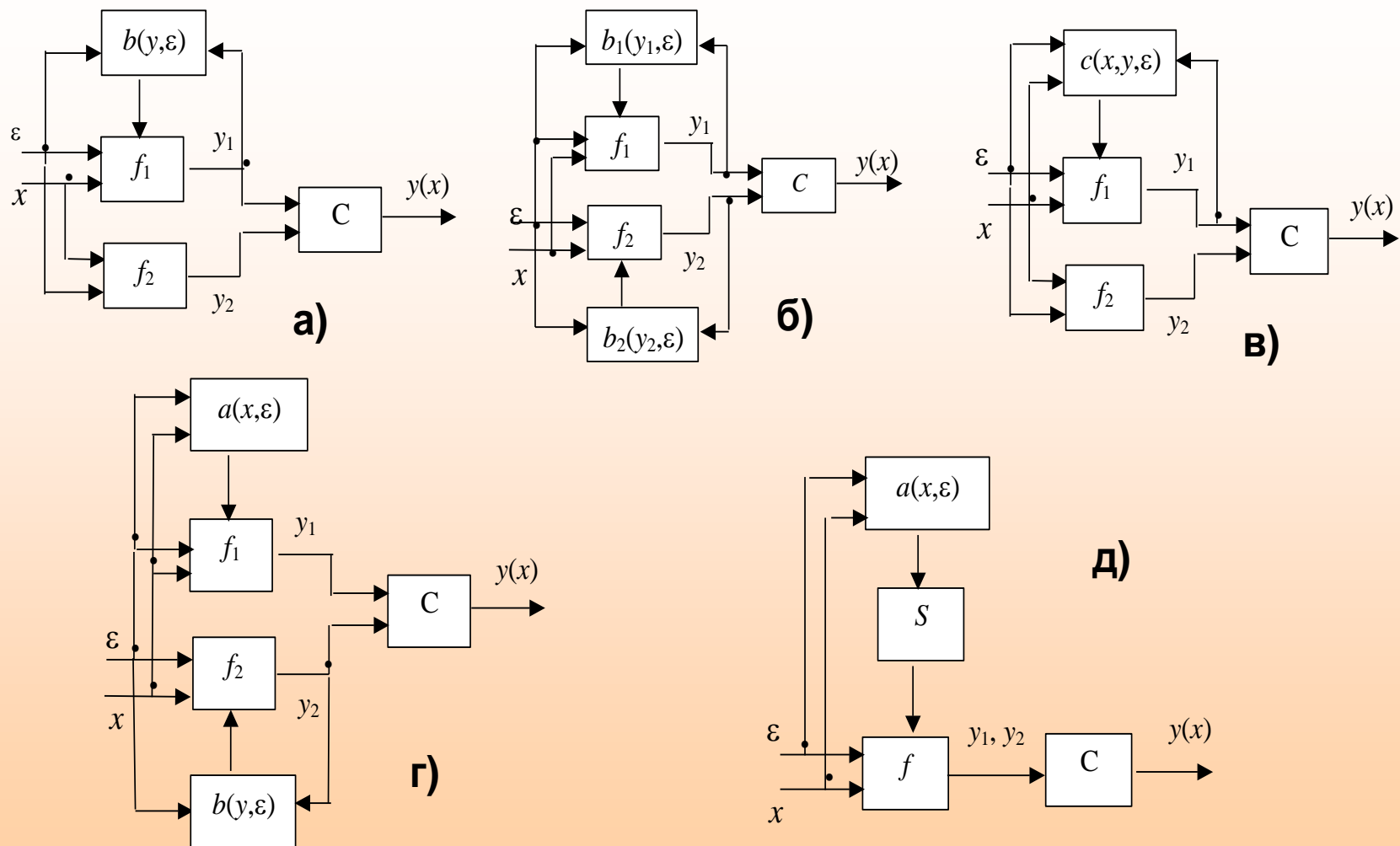


Рис.6. Структурные схемы инвариантных измерительных устройств уравновешивания

ПРИМЕРЫ. РАДИОВОЛНОВЫЕ ДАТЧИКИ С УПРАВЛЯЕМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Радиоволновые датчики уровня веществ с повышенной чувствительностью

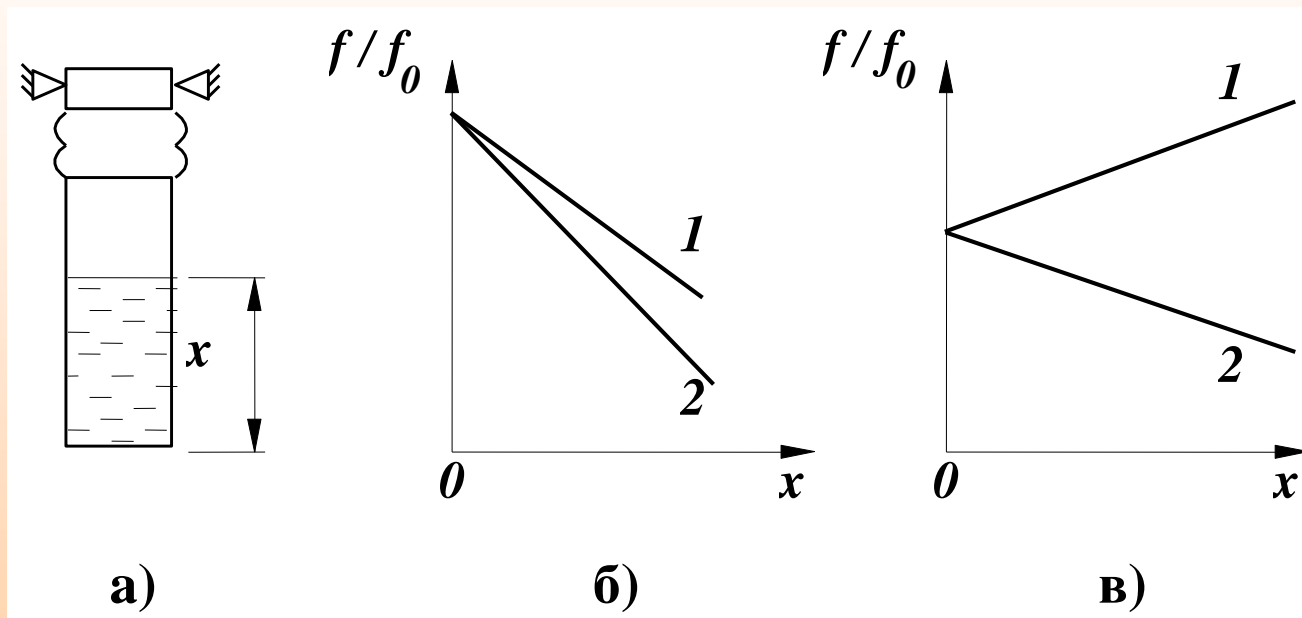


Рис. 7. Радиоволновый датчик уровня (массы) с изменяемой длиной (а) и выходные характеристики для датчика, заполняемого диэлектрическим (б) и электропроводным (в) веществами

1. Изменение геометрических параметров резонатора

$$y = f(x, a(x))$$

В качестве примера рассматривается резонатор, являющийся четвертьволновым отрезком длинной линии (коаксиальной, двухпроводной и др.). Этот отрезок короткозамкнут на его нижнем конце. Длина $l(x)$ отрезка длинной линии увеличивается при увеличении уровня x вещества в емкости (и в отрезке линии).

При этом

$$f(x) = f_0(x, l(x)) = \frac{c}{2(l(x) - x)} \quad (19)$$

$$S = \frac{df}{dx} = \frac{c}{2(l(x) - x)^2} - \frac{c}{2(l(x) - x)^2} \frac{dl}{dx} = S_0 + \Delta S \quad (20)$$

Здесь $S_0 = \frac{c}{2(l-x)^2} > 0$. Эта величина соответствует датчику с длиной

$$l(x) = l = const; \Delta S = -\frac{c}{2(l-x)^2} \frac{dl}{dx} < 0 .$$

Из (20) следует, что при $\left| \frac{dl}{dx} \right| > 1$ знаки значений S и S_0 чувствительности противоположные. При $\left| \frac{dl}{dx} \right| > 2$ также следует, что $|S| > |S_0|$.

Условие $\left| \frac{dl}{dx} \right| > 1$ выполняется, например, если $l(x) = ax$, $a > 1$. Условие $\left| \frac{dl}{dx} \right| > 2$ выполняется, если $l(x) = bx$, $b > 2$.

2. Резонаторный датчик уровня без подвижных элементов

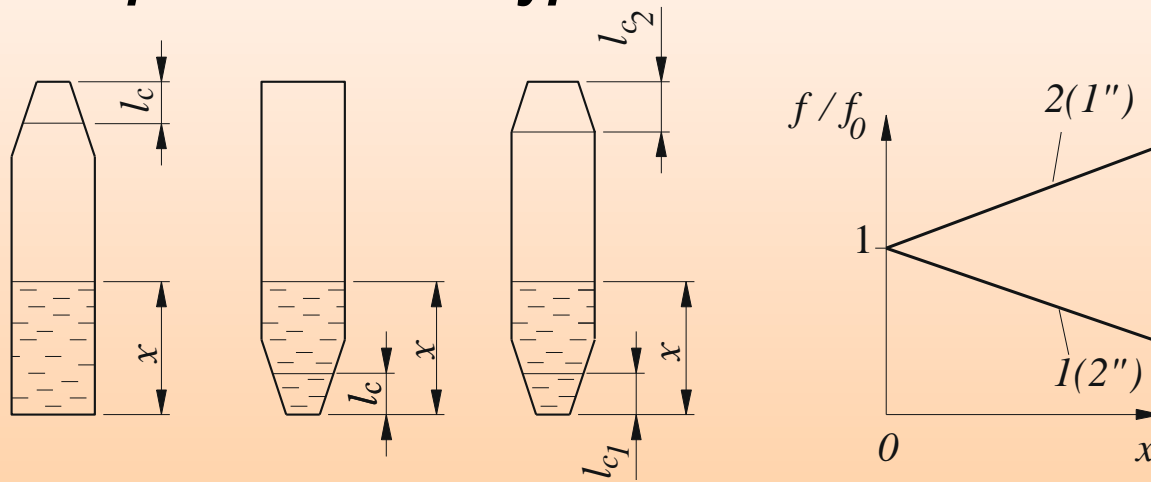


Рис. 8. Датчики уровня с конусообразными запредельными волноводами и их выходные характеристики при заполнении диэлектрическим (линии 1 and 2) и электропроводным (линии 1' and 2') веществами

Управляемые элементы радиоволновых датчиков

Для радиоволновых датчиков основная группа управляемых элементов состоит из *частотно-зависимых (дисперсионных)* элементов. Они позволяют изменять электрофизические или/и геометрические параметры датчика, точнее, тех его частей, где присутствует электромагнитное поле.

Среди таких элементов – *дисперсионные* элементы: волновод; запердельный волновод; вещество с дисперсионными электрофизическими параметрами; искусственный диэлектрик; замедляющая структура и др. Могут быть также использованы *связанные волноводы* с коэффициентом связи и распределением поля, зависящими от частоты; *толщина скин-слоя*, уменьшающаяся с увеличением частоты (например, возможно добавлять к полю основного датчика через скин-слой поле дополнительного объёма или устранять поле в этом объёме) и т. д.

Также могут быть применены другие элементы, обеспечивающие изменение геометрических параметров датчика (в частности, *упругие элементы*, например, *пружины*), перераспределение его электромагнитного поля (*пьезоэлементы* и др.).

3. Введение дисперсионного элемента в полость резонатора

$$y = f(x, b(y))$$

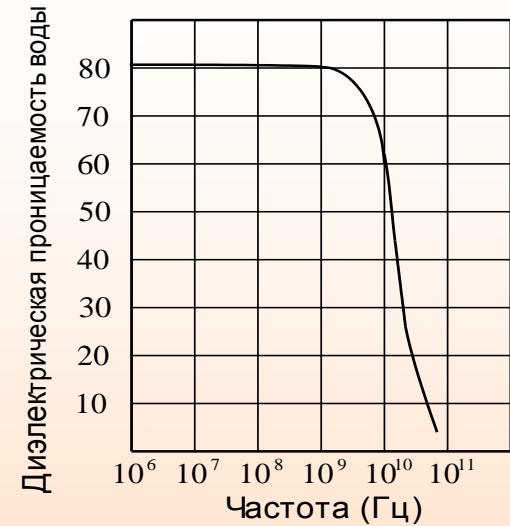
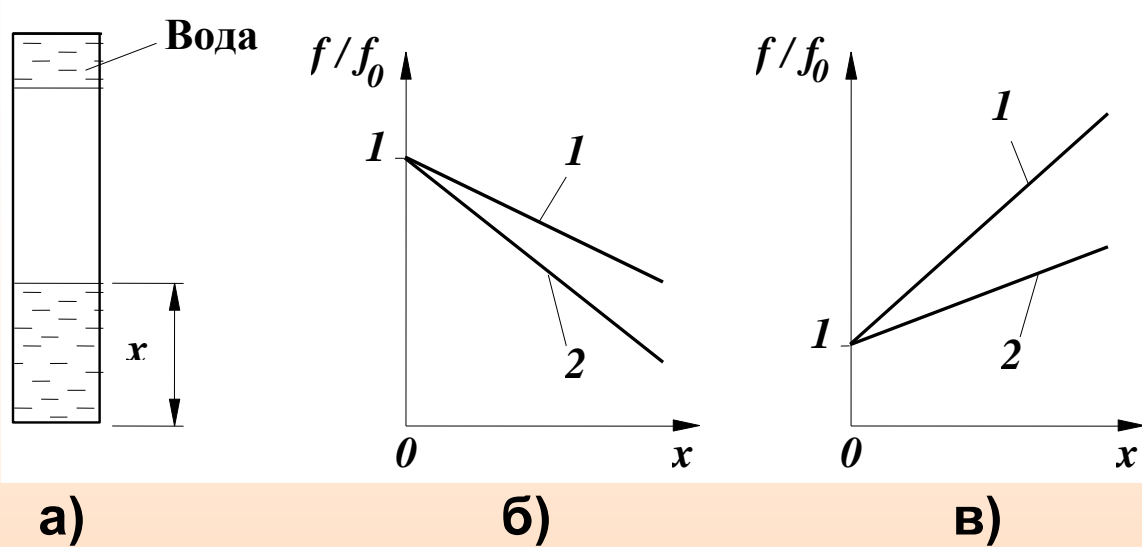


Рис. 10. Зависимость ϵ воды от частоты в СВЧ-диапазоне частот

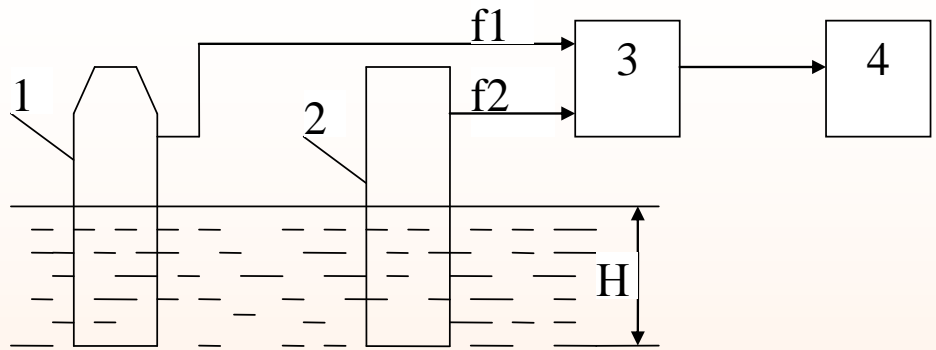
Рис.9. Датчик уровня с дисперсионным элементом (водой) внутри полости резонатора (а) и его выходные характеристики при заполнении диэлектрическим (б) и электропроводным (в) веществами

$$\frac{f(V)}{f_0} = \left[1 + (\varepsilon - 1)\varphi(V) + (\varepsilon_w(f) - 1)\varphi(V_w) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (21)$$

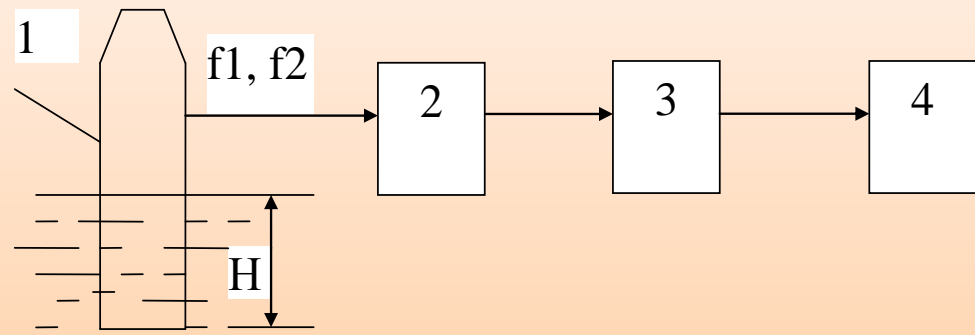
$$S = \frac{df}{dV} = - \frac{(\varepsilon - 1) \frac{\partial \varphi(V)}{\partial V}}{\frac{2f_0^2}{f^3} + \varphi(V_w) \frac{\partial \varepsilon_w}{\partial f}} \quad (22)$$

$$\frac{S}{S_0} \approx 1 - \frac{f_0}{2} \left[1 + (\varepsilon - 1)\varphi(V) \right]^{-\frac{3}{2}} \varphi(V_w) \frac{\partial \varepsilon_w}{\partial f} \quad (23)$$

Из (23) следует, что $S > S_0$, т. к. $\frac{\partial \varepsilon_w}{\partial f} < 0$.



a)



б)

Рис. 11. Инвариантные радиоволновые уровнемеры, содержащие два (а) и один (б) волноводные резонатора.

Система уравнений, соответствующая совместным преобразованиям f_1 и f_2 в схеме инвариантного уровнемера, следующая:

$$f_1 = \frac{f_{10}(V, V_{10}(f_1))}{\sqrt{1 + (\varepsilon - 1)\varphi_1(V, V_{10}(f_1))}} \quad (25)$$

$$f_2 = \frac{f_{20}}{\sqrt{1 + (\varepsilon - 1)\varphi_2(V)}} \quad (26)$$

Решение данной системы уравнений относительно V (т.е. уровня x) есть

$$A = \frac{f_{10}^2(V, V_{10}(f_1)) / f_1^2 - 1}{f_{20}^2 / f_2^2 - 1} \quad (27)$$

Функция A является инвариантом по отношению к диэлектрической проницаемости ε .

В формулах (25) и (26)

$$\varphi_1 = \frac{\int_{V_{10}(f_1)}^V E_{10}^2 dv}{\int_{V_{10}(f_1)}^V E_{10}^2 dv}, \quad \varphi_2 = \frac{\int_{V_{20}}^V E_{20}^2 dv}{\int_{V_{20}}^V E_{20}^2 dv} \quad (28)$$

Здесь $E_{10}(v)$ и $E_{20}(v)$ – распределения амплитуды напряженности электрического поля как функции от v в первом и втором резонаторах с объёмами V_{10} и V_{20} , соответственно.

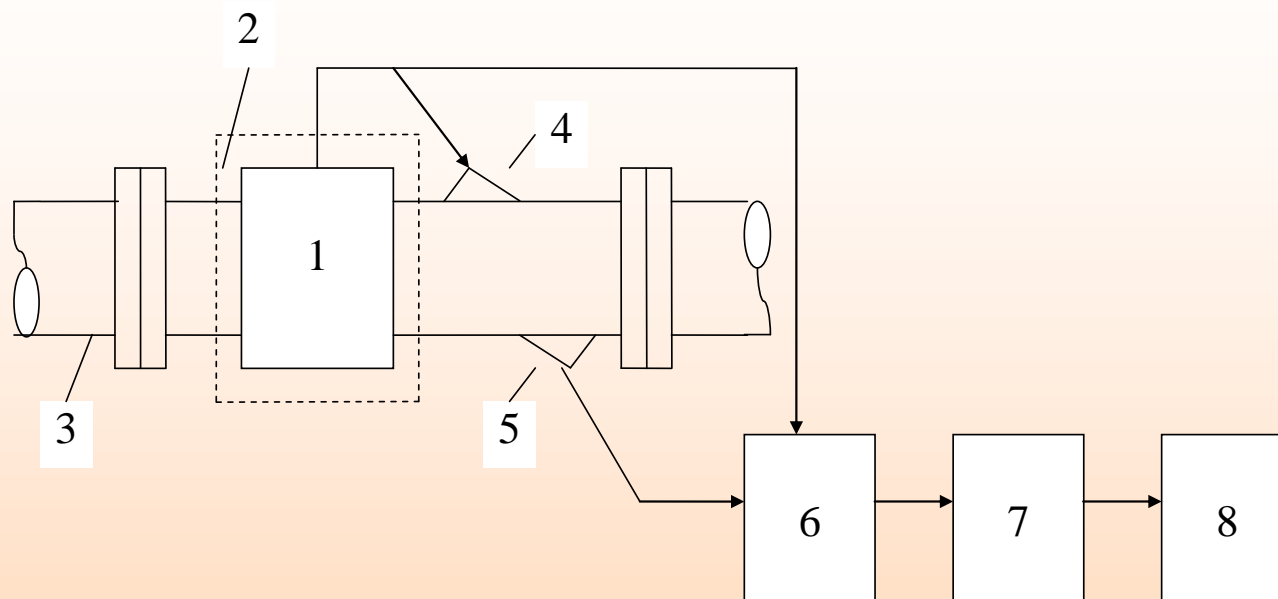


Рис. 12. Инвариантный радиоволновый расходомер

1 – датчик фазовой скорости электромагнитных волн, *2* – автогенератор, *3* – трубопровод, *4* – передающая антенна, *5* – приёмная антенна, *6* – смеситель частот, *7* – блок статистической обработки, *8* – индикатор

Собственная частота резонатора определяет частоту генератора 2. Если вещество занимает полость резонатора полностью, то частота $f_0(\varepsilon)$ генерируемых колебаний есть

$$f_0(\varepsilon) = \frac{f_{0n}}{\sqrt{\varepsilon}} \quad (29)$$

где f_{0n} – собственная частота полого резонатора.

Выходной сигнал с выхода смесителя соответствует усредненной усреднённой величине доплеровской частоты f_δ , равной

$$f_\delta = \frac{2f_0(\varepsilon)v\sqrt{\varepsilon} \cos \theta}{c} \quad (30)$$

Поскольку частота $f_0(\varepsilon)$ определяется соотношением (29), то будем иметь:

$$f_\delta = \frac{2f_{0n}v \cos \theta}{c} \quad (31)$$

Частота $f_\delta(v)$ является инвариантом по отношению к диэлектрической проницаемости ε .

Из соотношения (30) следует, что

$$\Delta f_{\partial} = \frac{2f_0 \sqrt{\varepsilon} \cos \theta}{c} \Delta v + \frac{2v \cos \theta}{c} (f_0 \sqrt{\varepsilon})' \Delta \varepsilon, \quad (32)$$

т.е. условие $S_{\varepsilon} + \Delta S_{\varepsilon} = 0$ в данном случае имеет вид:

$$(f_0(\varepsilon) \sqrt{\varepsilon})' = 0 \quad (33)$$

и, таким образом,

$$f_0(\varepsilon) = \frac{k}{\sqrt{\varepsilon}}, \quad (34)$$

где $k = \text{const}$.

При $\varepsilon = 1$ будем иметь $k = f_{0n}$; поэтому

$$f_0(\varepsilon) = \frac{f_{0n}}{\sqrt{\varepsilon}} \quad (35)$$

Это доказывает выполнение условия $S_{\varepsilon} + \Delta S_{\varepsilon} = 0$ при задании частоты в виде (35); данная частота аналитически совпадает с зависимостью (29).

МНОГОЗОНДОВЫЕ ДАТЧИКИ

Функция преобразования (ФП) датчика выражает связь его входной (измеряемой) x и выходной y величин:

$$y = f(x) \quad (36)$$

Чувствительность S_1 датчика, определяемая его ФП, при есть

$$S_1 = \frac{dy}{dx} \quad (37)$$

Выходная характеристика – функция преобразования (ФП) – многозондового датчика может быть представлена следующим образом:

$$y = f(a_1(x), a_2(x), \dots, a_k(x)) \quad (38)$$

Здесь $a_1(x), a_2(x), \dots, a_k(x)$ – функции преобразования, выражающие связь между измеряемой величиной x и выходными параметрами k зондов многозондового датчика.

В многозондовом датчике обеспечивается многовходовое воздействие величины x на функцию преобразования датчика (рис. 13).

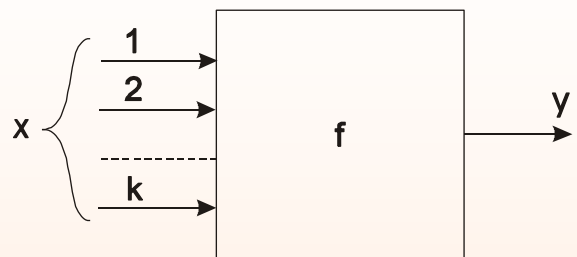


Рис. 13

Оно реализуется при воздействии величины x на каждый зонд датчика, формируя таким путем функцию преобразования этого датчика (рис. 14).

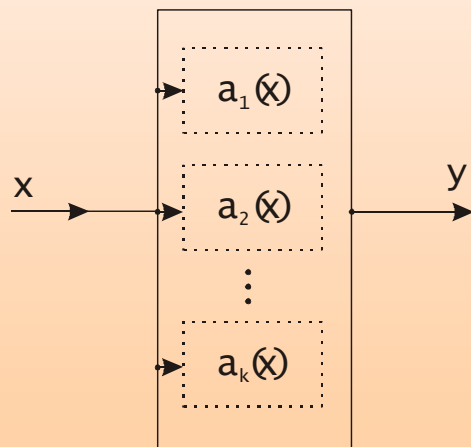


Рис.14

Чувствительность S_k многозондового датчика с k зондами к измеряемой величине x вытекает из рассмотрения соотношения (38):

$$S_k = \sum_{i=1}^k \frac{\partial f}{\partial a_i} \frac{\partial a_i}{\partial x}, \quad k = 2, 3, \dots \quad (39)$$

Если

$$a_1(x) = a_2(x) = \dots = a_k(x), \quad (40)$$

то

$$S_k = kS_1, \quad (41)$$

где S_1 – значение S_k при $k=1$.

Для датчиков, базирующихся на различных физических принципах, функции $a_1(x), a_2(x), \dots, a_k(x)$ выражают связь между x и различными величинами, оказывающими влияние на ФП датчика.

Инвариантные измерительные устройства с многозондовыми датчиками

Если на ФП датчика со многими зондами воздействует, помимо измеряемой величины x также и возмущающий фактор ε , т.е.

$$y = f\{a_1(x, \varepsilon), a_2(x, \varepsilon), \dots, a_k(x, \varepsilon)\}, \quad (42)$$

то связь изменения Δy величины y с изменением Δx величины x и $\Delta \varepsilon$ величины ε есть

$$\Delta y = \sum_{i=1}^k \frac{\partial f}{\partial a_i} \frac{\partial a_i}{\partial x} \Delta x + \sum_{i=1}^k \frac{\partial f}{\partial a_i} \frac{\partial a_i}{\partial \varepsilon} \Delta \varepsilon \quad (43)$$

При этом возмущение ε может оказывать воздействие только на m ($m < k$) зондов датчика.

Из (43) следует, что обеспечить независимость результатов измерения x от влияния ε можно при выполнении условия

$$\sum_{i=1}^m \frac{\partial f}{\partial a_i} \frac{\partial a_i}{\partial \varepsilon} \equiv 0, \quad m \leq k = 2, 3, \dots \quad (44)$$

Соотношение (44) соответствует известному методу стабилизации ФП, реализуемому теперь с применением многих зондов в составе датчика (рис.15).

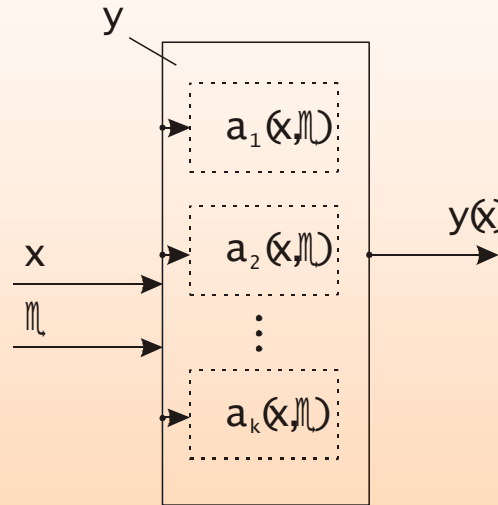


Рис. 15

При этом одновременно, как это видно из (43), обеспечивается повышение чувствительности датчика именно за счет применения многих зондов. При $m = 2$

из (44) следует, что

$$\frac{\partial f}{\partial a_1} \frac{\partial a_1}{\partial \varepsilon} = - \frac{\partial f}{\partial a_2} \frac{\partial a_2}{\partial \varepsilon} \quad (45)$$

Если обеспечить выполнение (44) на практике затруднительно, то инвариантность выходной величины измерительного устройства к влиянию ε может быть достигнута с применением двух датчиков с разными ФП y_1 и y_2 и решением относительно x системы уравнений

$$\begin{aligned} y_1 &= f_1\{a_1(x, \varepsilon), a_2(x, \varepsilon), \dots, a_k(x, \varepsilon)\}, \\ y_2 &= f_2\{b_1(x, \varepsilon), b_2(x, \varepsilon), \dots, b_l(x, \varepsilon)\}, \end{aligned} \quad (46)$$

с исключением из результата $A(f_1, f_2)$ совместного преобразования f_1 и f_2 величины ε .

Здесь $a_1, a_2, \dots, a_k; b_1, b_2, \dots, b_l$ – функции преобразования зондов первого и второго датчиков, соответственно; в общем случае $k \neq l$. Решение системы уравнений производится в вычислительном устройстве.

ПРИМЕРЫ МНОГОЗОНДОВЫХ ДАТЧИКОВ: РАДИОВОЛНОВЫЕ ДАТЧИКИ

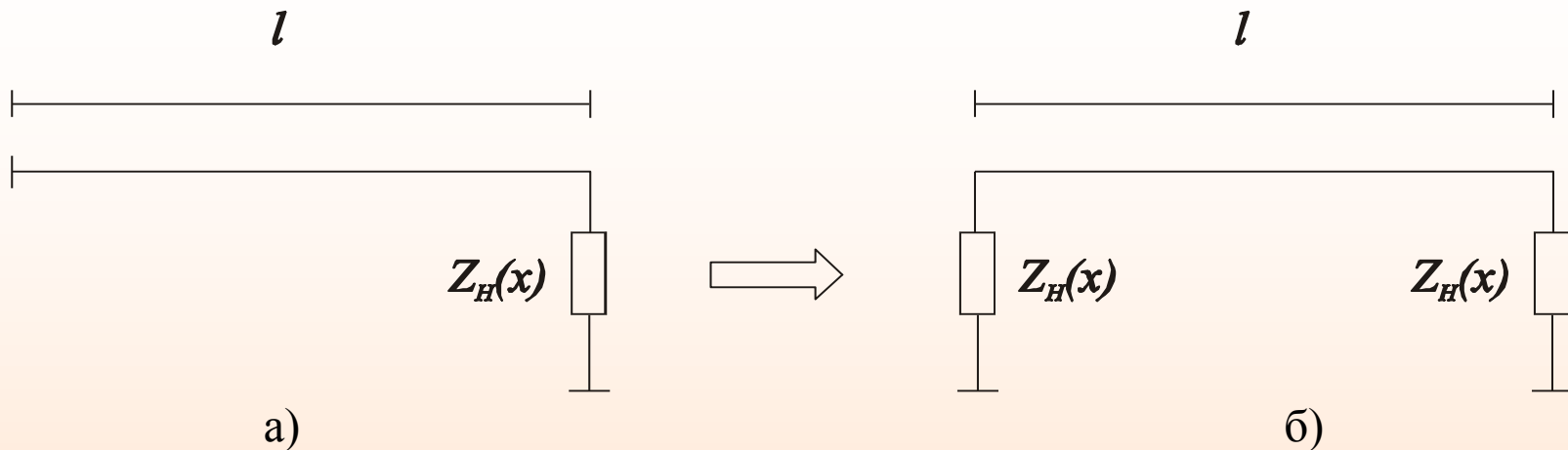


Рис. 16. Резонаторный датчик с одним (а) и двумя (б) “рабочими” торцами

$$2\beta l + \Delta\varphi(x) = 2\pi n, \quad n = 1, 2, \dots \quad (47)$$

$$2\beta l + \Delta\varphi_1(x) + \Delta\varphi_2(x) = 2\pi n, \quad n = 1, 2, \dots \quad (48)$$

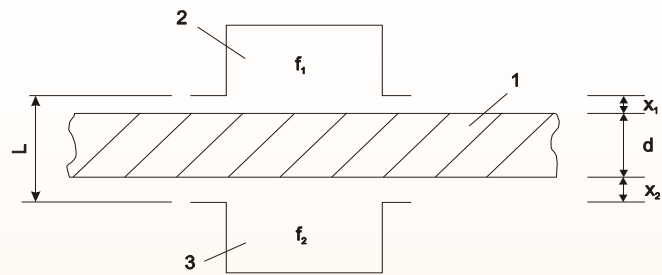
Из (48) находим

$$f_n = \frac{[2\pi n - \Delta\varphi_1(x) - \Delta\varphi_2(x)]v\phi}{2l} \quad (49)$$

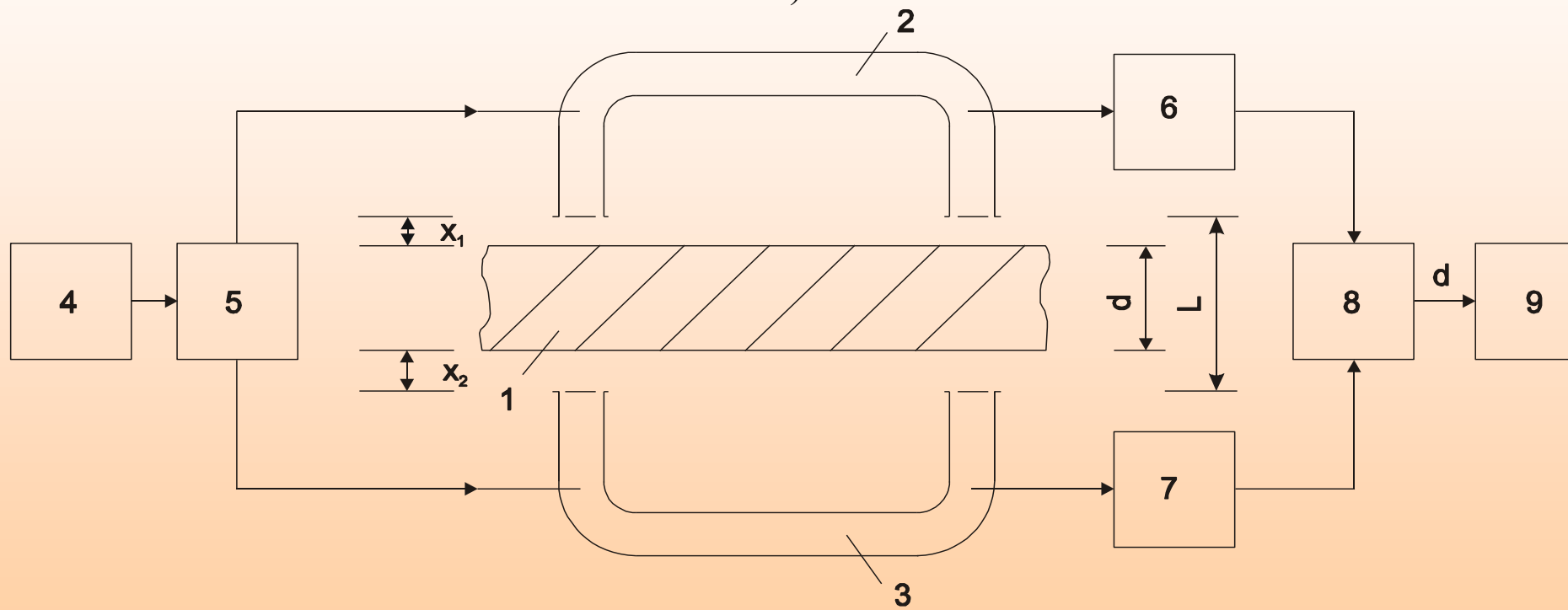
и, следовательно, чувствительность данного резонаторного датчика есть

$$S = \frac{df_n}{dx} = -\frac{v\phi}{2l} \left(\frac{d(\Delta\varphi_1)}{dx} + \frac{d(\Delta\varphi_2)}{dx} \right) \quad (50)$$

Если нагрузки одинаковые, так что $\Delta\varphi_1(x) = \Delta\varphi_2(x)$, то $S = -\frac{v\phi}{l} \frac{d(\Delta\varphi)}{dx} = 2S_0$



a)



б)

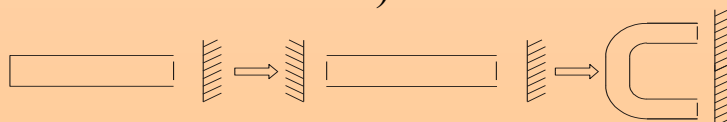


Рис. 17. Резонаторные датчики толщины

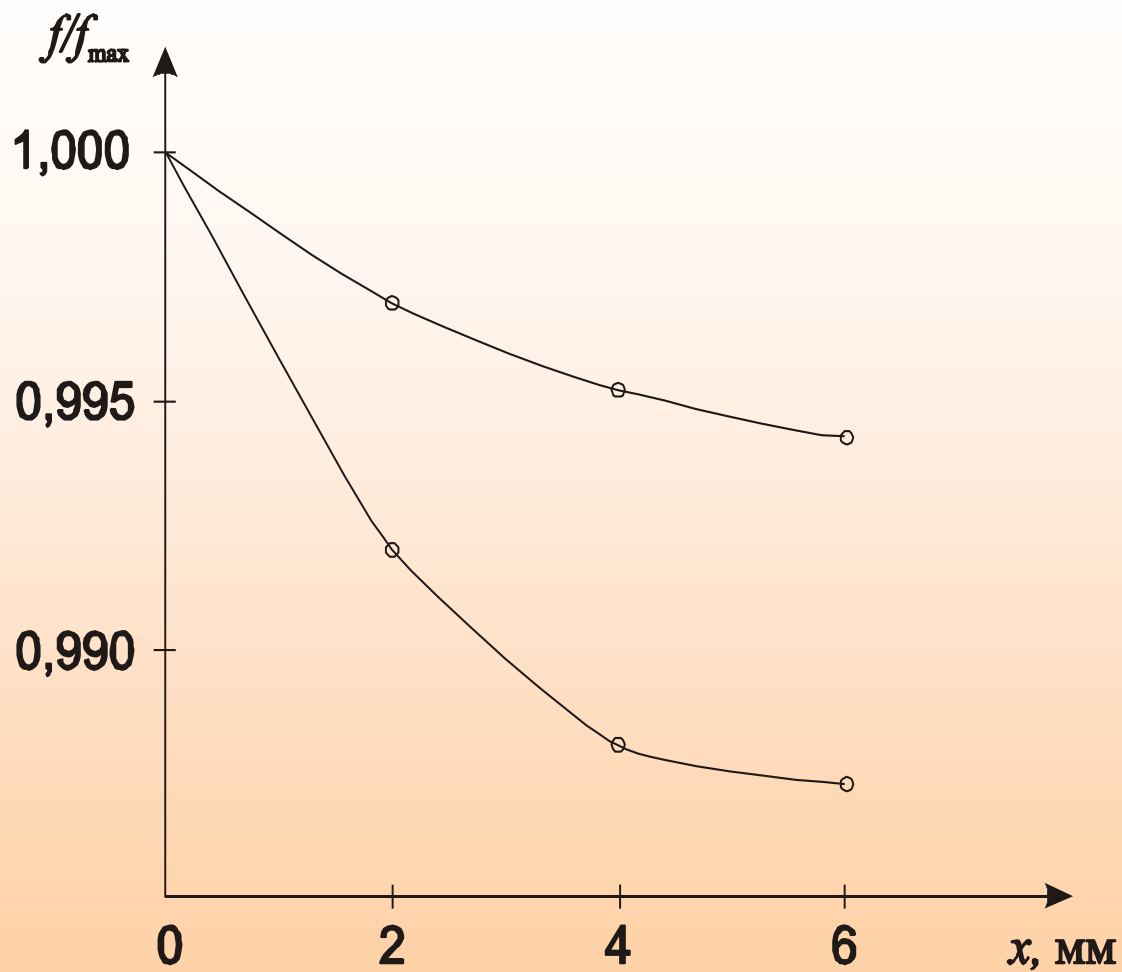
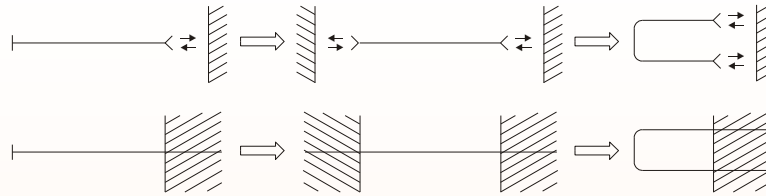


Рис.18. Экспериментально полученные зависимости $f(x)$ для резонаторов с одной (верхняя кривая) и двумя (нижняя кривая) “рабочими” торцами.

а)



б)

Рис. 19. Эволюция схем бесконтактного (а) и контактного (б) взаимодействия волн с отражающей поверхностью.

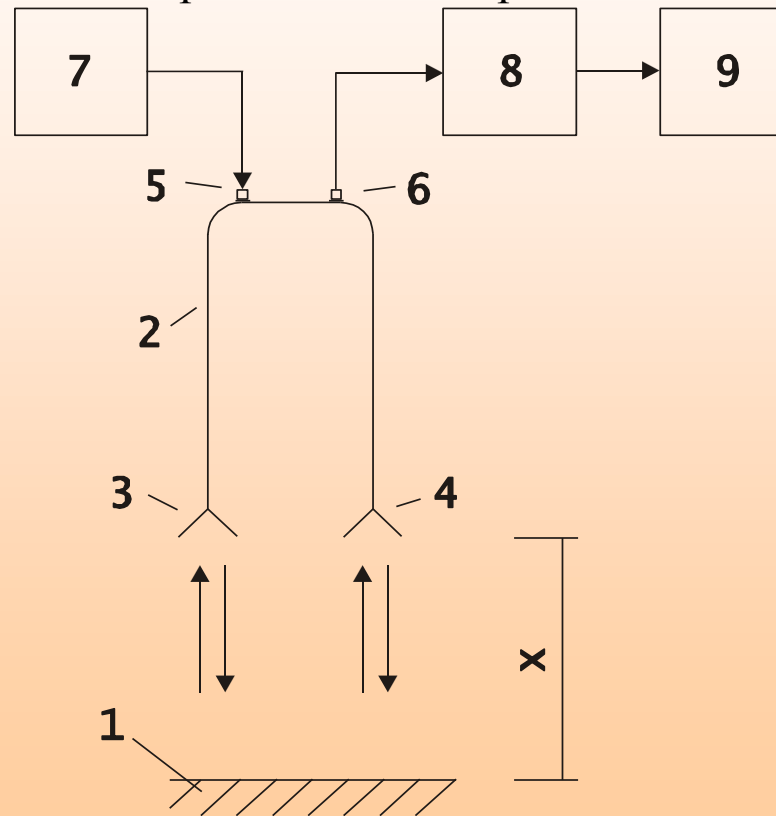


Рис. 20. Схема устройства для бесконтактного измерения расстояния (уровня вещества)

$$2\beta(l + 2x) + \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 = 2\pi n, n = 1, 2, \dots \quad (51)$$

$$n = \frac{2(l + 2x)f_n}{c} \quad (52)$$

$$N = \frac{2(l + 2x)(f_2 - f_1)}{c} \quad (53)$$

$$S = \frac{dN}{dx} = \frac{4(f_2 - f_1)}{c} \quad (54)$$

$$N' = \frac{2(l + x)(f_2 - f_1)}{c} \quad (55)$$

$$S_0 = \frac{dN'}{dx} = \frac{2(f_2 - f_1)}{c} \quad (56)$$

$$\Delta x = \frac{\Delta N c}{4(f_2 - f_1)} \quad (57)$$

Для диапазона частот $f_1 = 5$ ГГц, $f_2 = 10$ ГГц абсолютная погрешность измерения $\Delta x = 15$ мм.

Для диапазона измерения $0 \div 1000$ мм это соответствует относительной погрешности $\delta = 1,5$ %.

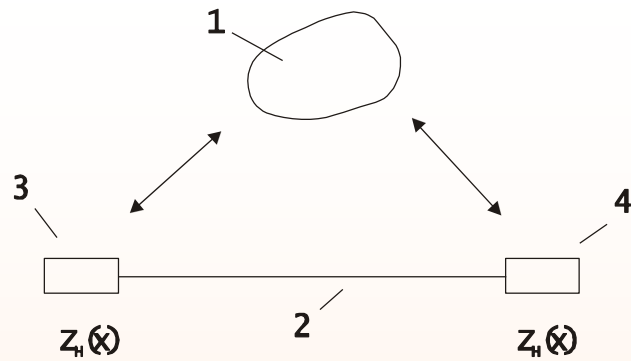


Рис. 21. Взаимодействие объекта с зондами на торцах волновода.

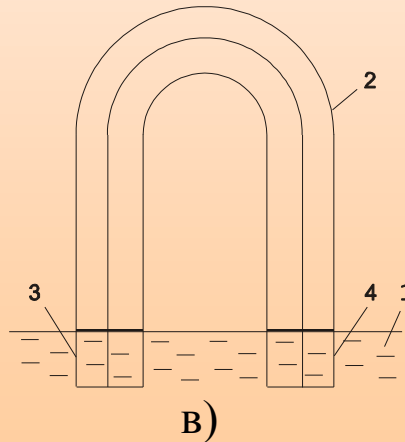
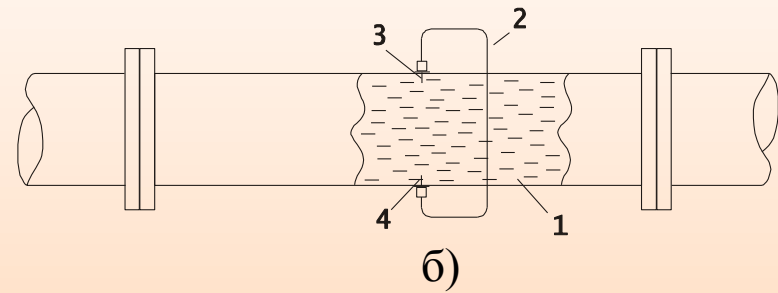
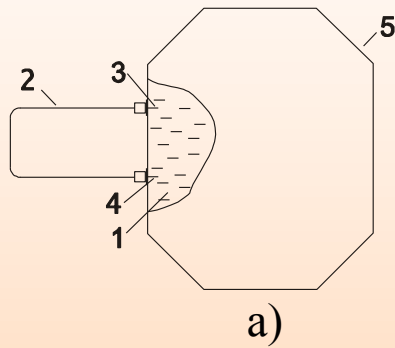


Рис. 22. Примеры применения датчиков с торцевыми зондами

Схемы микроволновых ИУ с многозондовыми резонаторными датчиками (примеры)

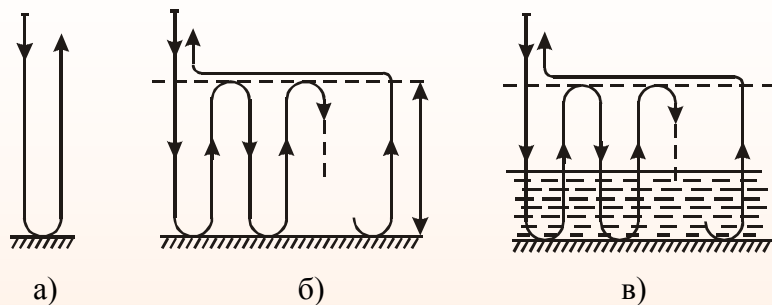


Рис. 23. Схемы взаимодействия волн с объектом в резонаторах датчиков расстояния (уровня вещества в емкости).

$$\Delta x_k = \frac{c}{2k(f_2 - f_1)} \quad \text{При } k = 1 \text{ отсюда следует } \Delta x_1 = \frac{c}{2(f_2 - f_1)}$$

При зондировании электромагнитными волнами СВЧ-диапазона частот с девиацией их частоты в пределах $9 \div 11$ ГГц имеем $\Delta x_1 = 7,5$ см, $\Delta x_2 = 3,75$ см (при $k = 2$); $\Delta x_k = 7,5/k$ см, $k = 3, 4, \dots$; если $k = 3$, то $\Delta x_3 = 2,5$ см; при $k = 10$ будем иметь $\Delta x_{10} = 7,5$ мм.

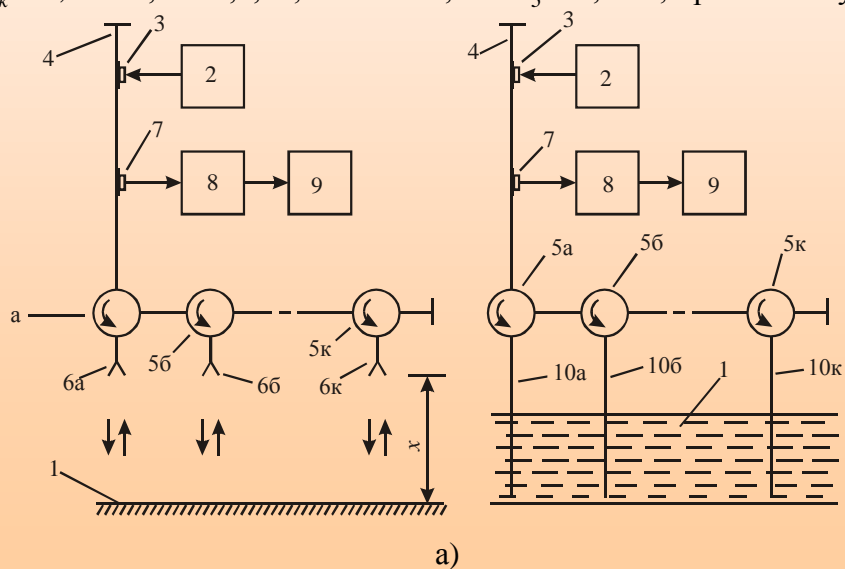


Рис. 24. Схемы устройств с резонаторными датчиками расстояний (уровня вещества в емкости).

1 – контролируемый объект, 2 – генератор частотно-модулированных колебаний, 3 – элемент связи, 4 – измерительный волновод, $5a, 5б, \dots, 5к$ – циркуляторы, $6a, 6б, \dots, 6к$ – приемо-передающие антенны, 7 – элемент связи, 8 – детектор, 9 – регистратор, $10a, 10б, \dots, 10к$ – волноводы.

ВЫВОДЫ

Предложенные методы построения датчиков и ИУ позволяют:

- создавать новые приборы, работа которых основана на различных физических принципах, со значительно расширенными функциональными возможностями – датчиков с повышенной чувствительностью; ИУ в целом с повышенной чувствительностью и точностью;
- существенно улучшить функциональные характеристики (точность, чувствительность) существующих приборов, особенно тех, где исчерпаны традиционные пути их улучшения.

Основное требование реализации данных методов состоит в наличии соответствующих функциональных элементов датчиков, которые следует определить при их синтезе.

Спасибо за внимание!