

Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

I. A. Попов, Теория кольцевого детектора при работе на активную нагрузку, зашунтированную емкостью,  
*Avtomat. i Telemekh.*, 1955, Volume 16, Issue 1, 96–110

<https://www.mathnet.ru/eng/at13391>

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use

<https://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.14.82

May 16, 2025, 20:07:06



## ТЕОРИЯ КОЛЬЦЕВОГО ДЕТЕКТОРА ПРИ РАБОТЕ НА АКТИВНУЮ НАГРУЗКУ, ЗАШУНТИРОВАННУЮ ЕМКОСТЬЮ

И. А. ПОПОВ

(Москва)

Дается анализ работы кольцевого детектора и исследуются режимы и параметры схемы кольцевого детектора.

### Введение

Во многих измерительных установках и устройствах автоматического регулирования широко применяются фазовые детекторы.

Фазовый детектор в общем виде представляет собой нелинейный шестиполюсник, на входные клеммы которого подаются синусоидальные напряжения  $U_K$  и  $U_P$  ( $U_K > U_P$ ), а на нагрузку развивается постоянное напряжение  $U_*$  (рис. 1, а).

Теория и основные формулы для расчета фазовых детекторов приведены в отечественной и иностранной литературе [1—4] с предположением, что рабочее напряжение  $U_P$  много меньше коммутирующего напряжения  $U_K$  ( $\frac{U_P}{U_K} \ll 1$ ).

При этом условии в работах [1—4] получено, что детектор работает как идеальное векторное устройство, для которого

$$U_* = kU_P \cos \varphi = kU_a. \quad (1)$$

Здесь  $U_a$  — проекция вектора рабочего напряжения  $U_P$  на вектор коммутирующего напряжения  $U_K$  (см. рис. 1, б),  $k$  — коэффициент пропорциональности, определяемый схемой детектора,

$$\bar{U}_P = U_a + jU_x, \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{U_x}{U_a}.$$

Особо следует отметить работу В. И. Житомирского [3], в которой анализируется кольцевой детектор при нагрузке на активное сопро-

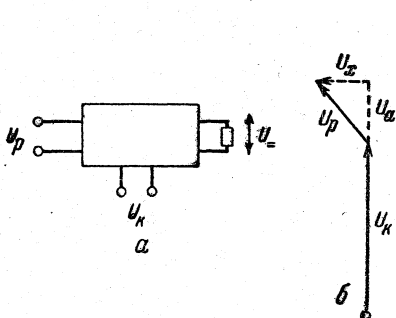


Рис. 1

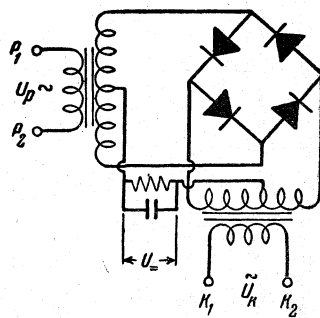


Рис. 2

тивление. Считая в такой схеме  $U_K \gg U_P$ , автор выводит формулы, определяющие амплитуды спектра частот в нагрузке, входные и выходные сопротивления схемы.

Во многих случаях при выполнении схем желательно сделать величину коммутирующего напряжения возможно меньшей, так как при этом улучшается к. п. д. схемы и облегчаются условия работы вентилялей. Кроме того, нагрузкой детектора обычно служит активное сопротивление, зашунтированное емкостью. Эта емкость устанавливается для того, чтобы избежать различных нежелательных явлений, вызванных прохождением через нагрузку переменных токов с частотой, равной или кратной частоте генераторов, питающих схему.

Ввиду этого в статье излагается теория фазового детектора при конечном соотношении между рабочими и коммутирующими напряжениями для активной нагрузки, зашунтированной емкостью.

Все изложение ведется применительно к схеме кольцевого детектора (рис. 2), так как кольцевой детектор, благодаря ряду известных преимуществ перед другими схемами фазовых детекторов (спектр частот на выходе, относительное постоянство нагрузки на питающие генераторы, отсутствие подмагничивания в трансформаторах [2, 5]), получил наиболее широкое распространение. Однако предложенный метод может быть использован и для анализа других схем.

### 1. Основные предпосылки при анализе

При выводе всех соотношений будем исходить из следующих предпосылок.

1. Вольтамперная характеристика вентиля  $i(e)$  (рис. 3а) аппроксимируется прямой, отсекающей на оси напряжений некоторое значение  $E_0$ .

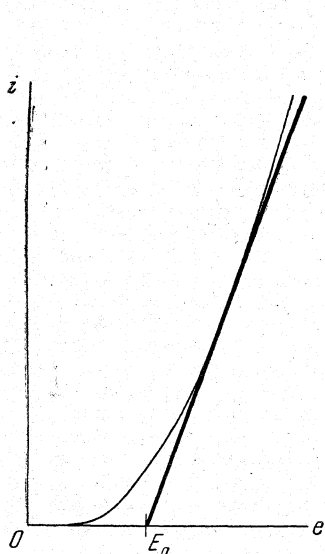


Рис. 3а

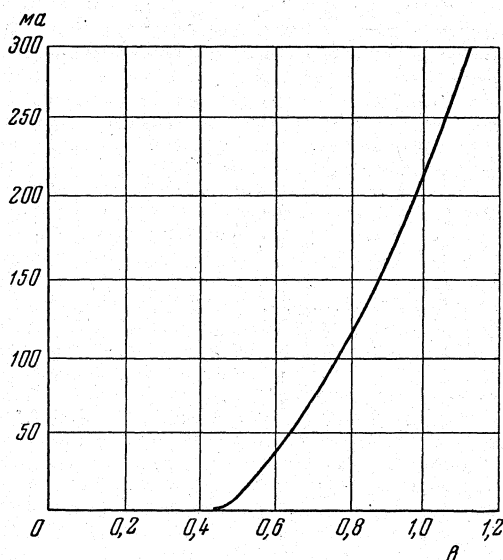


Рис. 3б

Тогда аналитическое выражение идеализированной характеристики запишется в таком виде:

при  $e < E_0$

$$i(e) = 0;$$

при  $e > E_0$

$$i(e) = \frac{e - E_0}{R_i},$$

где  $R_i$  — внутреннее сопротивление вентиля.

Справедливость линейно-ломаной аппроксимации следует из того, что каждый вентиль фазового детектора обычно работает при больших переменных напряжениях, значительно превышающих начальный нелинейный участок его характеристики.

Учет сдвига характеристики  $E_0$  необходим при работе схемы на твердых вентилях (купроксные или селеновые шайбы), так как они начинают проводить ток лишь при значительных положительных напряжениях (рис. 3 б).

2. Внутренние сопротивления генераторов, создающих рабочее и коммутующее напряжения, а также самоиндукции рассеяния трансформаторов, равны нулю. Ниже будет показано, что входные сопротивления фазового детектора в общем случае существенно нелинейны. Ввиду этого при конечной величине внутренних сопротивлений генераторов и трансформаторов искажается форма напряжения на вентилях детектора, чем существенно осложняется анализ. С другой стороны, для многих схем такая предпосылка оправдана.

3. Нагрузкой детектора служит активное сопротивление, шунтированное очень большой емкостью. Величина шунтирующей емкости практически ограничена необходимой постоянной времени всего устройства, однако эту емкость можно считать столь большой, что переменные токи с частотой, равной частоте питающих схему генераторов, не создают на ней существенного падения напряжения.

## 2. Основная формула кольцевого детектора

Определим основную формулу кольцевого детектора, т. е. найдем зависимость между выпрямленным током  $I_{\Sigma}$  и проекцией вектора рабочего

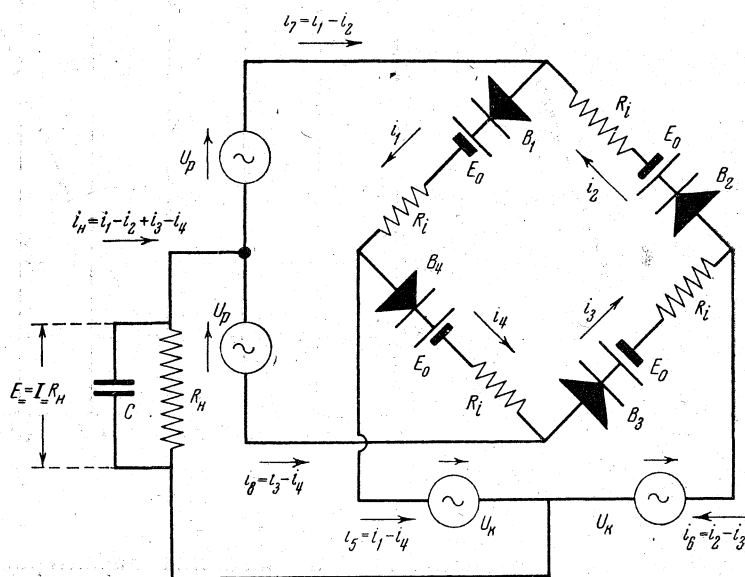


Рис. 4а

напряжения на вектор коммутующего напряжения  $U_a$ :

$$I_{\Sigma} = (U_a).$$

В дальнейшем  $U_a$  будем называть активной составляющей рабочего напряжения, а  $U_x$  — реактивной составляющей рабочего напряжения (рис. 4 б).

На рис. 4а представлена схема, полученная из схемы рис. 2 путем пересчета э. д. с. генераторов во вторичную обмотку трансформаторов. Самоиндукция трансформаторов на схеме не указана, поскольку она включается параллельно источникам напряжения, а потому не влияет на работу детектора.

Наличие сдвига  $E_0$  в характеристиках вентилей учтено включением э. д. с.  $E_0$ . При этом характеристики вентилей можно считать начинающимися из начала координат.

Напряжение на нагрузке

$$E_{\Sigma} = I_{\Sigma} R_{\Pi},$$

где  $I_{\Sigma}$  — постоянная слагающая тока в цепи нагрузки:

$$I_{\Sigma} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_{\Sigma} dt.$$

Из схемы рис. 4а нетрудно видеть, что в любой момент времени

$$i_{\Sigma} = i_1 - i_2 + i_3 - i_4.$$

Откуда

$$I_{\Sigma} = I_{01} - I_{02} + I_{03} - I_{04},$$

где  $I_{0n}$  — постоянная слагающая тока вентиля  $n$ .

Поскольку в нашем случае напряжение на нагрузке принято постоянным, то ток в каждом вентиле при любом соотношении рабочего и коммутирующего напряжений представляется косинусоидальными импульсами с некоторым углом отсечки  $\theta_n$ . Постоянную слагающую таких импульсов тока можно определить, используя известную функцию  $\gamma_0(\cos \theta)$  [6]:

$$I_{0n} = \frac{1}{R_i} U_n \gamma_0(\cos \theta_n),$$

где  $U_n$  — амплитуда переменного напряжения, действующего на вентиль,  $\gamma_0(\cos \theta_n)$  — функция угла отсечки, график которой нанесен на рис. 5.

Из схемы рис. 4а и рис. 4б можно заключить

$$\begin{aligned} I_{01} &= \frac{U_1}{R_i} \gamma_0(\cos \theta_1), & \cos \theta_1 &= \frac{E_0 + I_{\Sigma} R_{\Pi}}{U_1}, \\ I_{02} &= \frac{U_2}{R_i} \gamma_0(\cos \theta_2), & \cos \theta_2 &= \frac{E_0 - I_{\Sigma} R_{\Pi}}{U_2}, \\ I_{03} &= \frac{U_3}{R_i} \gamma_0(\cos \theta_3), & \cos \theta_3 &= \frac{E_0 + I_{\Sigma} R_{\Pi}}{U_3}, \\ I_{04} &= \frac{U_4}{R_i} \gamma_0(\cos \theta_4), & \cos \theta_4 &= \frac{E_0 - I_{\Sigma} R_{\Pi}}{U_4}, \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$\bar{U}_1 = -\bar{U}_3 = \bar{U}_{\Sigma} + \bar{U}_p, \quad \bar{U}_2 = \bar{U}_4 = \bar{U}_{\Sigma} - \bar{U}_p.$$

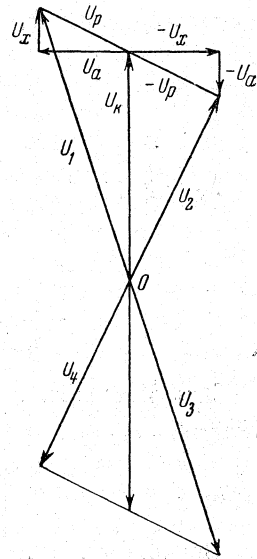


Рис. 4б

Произведя сложение этих токов, получим

$$I_{=} = \frac{2}{R_i} [U_1 \gamma_0(\cos \theta_1) - U_2 \gamma_0(\cos \theta_2)]. \quad (3)$$

Для определения основной формулы составим выражения для переменных напряжений на вентолях  $U_1$  и  $U_2$ .

Из рис. 4б очевидно, что

$$U_1 = \sqrt{(U_R + U_a)^2 + U_x^2}; \quad (4)$$

$$U_2 = \sqrt{(U_R - U_a)^2 + U_x^2}; \quad (5)$$

Для упрощения записи введем следующие безразмерные величины:

$$\frac{U_1}{U_R} = A_1; \quad \frac{U_2}{U_R} = A_2; \\ \frac{E_0}{U_R} = z; \quad \frac{U_a}{U_R} = y; \quad \frac{U_x}{U_R} = x; \quad \frac{I_{=} R_R}{U_R} = \Delta. \quad (6)$$

Учитывая эти обозначения, запишем соотношение (3) следующим образом:

$$\frac{\Delta R_i}{2R_R} = A_1 \gamma_0(\cos \theta_1) - A_2 \gamma_0(\cos \theta_2). \quad (7)$$

Значения  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $\cos \theta_1$  и  $\cos \theta_2$  могут быть получены из (4), (5) и (2):

$$A_{1,2} = (1 \pm y) \sqrt{1 + \frac{x^2}{(1 \pm y)^2}}, \quad (8)$$

$$\cos \theta_{1,2} = \frac{z \pm \Delta}{(1 \pm y) \sqrt{1 + \frac{x^2}{(1 \pm y)^2}}}. \quad (9)$$

Выражение (7) представляет собой основную формулу детектора как функцию безразмерных параметров.

Учитывая, что  $x < 1$ ,  $y < 1$ ,  $z < 1$ , выражения (8) и (9) можно представить в виде сходящихся рядов:

$$A_{1,2} = (1 \pm y) \left( 1 + \frac{x^2}{2(1 \pm y)^2} - \dots \right), \quad (10)$$

$$\cos \theta_{1,2} = \frac{z \pm \Delta}{1 \pm y} \left( 1 - \frac{x^2}{2(1 \pm y)^2} + \dots \right). \quad (11)$$

Функцию  $\gamma_0(\cos \theta)$  представим в виде разложения в ряд относительно значений  $\cos \theta = 0$ . Используя первые три члена этого разложения, имеем

$$\gamma_0(\cos \theta) = \frac{1}{\pi} - \frac{\cos \theta}{2} + \frac{\cos^3 \theta}{2\pi}. \quad (12)$$

График этой функции нанесен на рис. 5 пунктиром. Из рис. 5 следует, что принятая аппроксимация функции дает хорошее совпадение при

$$\cos \theta < 0,7. \quad (13)$$

Подставив выражение (11) в (12), а затем (12) и (10) в (7), получим сходящийся ряд:

$$\frac{\Delta R_i}{2R_R} = \sum_{n=0}^{\infty} c_n x^k y^l z^m \Delta^p. \quad (14)$$

Здесь  $c_n$  — постоянный коэффициент ( $c_n < 1$ ),  $k, l, m, p$  — целые числа, равные нулю или больше нуля.

Ниже будет показано, что детектор дает линейную зависимость выходного тока от проекции вектора рабочего напряжения на вектор коммутирующего напряжения [в соответствии с формулой (1)] лишь при  $x, y, z, \Delta$ , малых по сравнению с единицей. Грубо можно считать, что  $x, y, z$  должны быть во всяком случае меньше 0,3. При этом условии члены ряда быстро убывают по мере возрастания показателей степени у их сомножителей.

Если пренебречь по малости членами, у которых

$$k + l + m + p \geq 4, \quad (15)$$

то после некоторых преобразований имеем:

$$\Delta \left[ 1 + \frac{R_i}{2R_H} - \frac{2}{\pi} z \right] = \frac{2y}{\pi} \left( 1 - \frac{x^2}{2} \right) - \frac{y}{\pi} (\Delta^2 + z^2). \quad (16)$$

Это выражение представляет особое квадратное уравнение относительно искомой величины  $\Delta$ .

Решая квадратное уравнение (16) и учитывая в решении члены, у которых сумма степеней при  $x, y, z$  удовлетворяет условию (15), получим

$$\Delta = \frac{\frac{2y}{\pi} \left[ 1 - \frac{x^2}{2} - \frac{z^2}{2} - \frac{2y^2}{\pi^2 \left( 1 + \frac{R_i}{2R_H} \right)^2} \right]}{1 + \frac{R_i}{2R_H} - \frac{2}{\pi} z}. \quad (17)$$

Это выражение представляет основную формулу детектора  $\Delta(y)$ , выраженную в явном виде, как функцию безразмерных параметров.

Из выражения (17) следует, что зависимость  $\Delta(y)$  нелинейна, причем отклонение от линейности определяется членом

$$-\frac{2y^2}{\pi^2 \left( 1 + \frac{R_i}{2R_H} \right)^2}.$$

Уменьшение значения этого члена возможно при переходе к малым значениям  $y$  или при соотношении  $\frac{R_i}{2R_H} \rightarrow \infty$ .

При малости этого члена по сравнению с единицей формула (17) принимает вид:

$$\Delta = \frac{2}{\pi} \frac{y}{1 + \frac{R_i}{2R_H} - \frac{2}{\pi} z} \left[ 1 - \frac{x^2}{2} - \frac{z^2}{2} \right]. \quad (18)$$

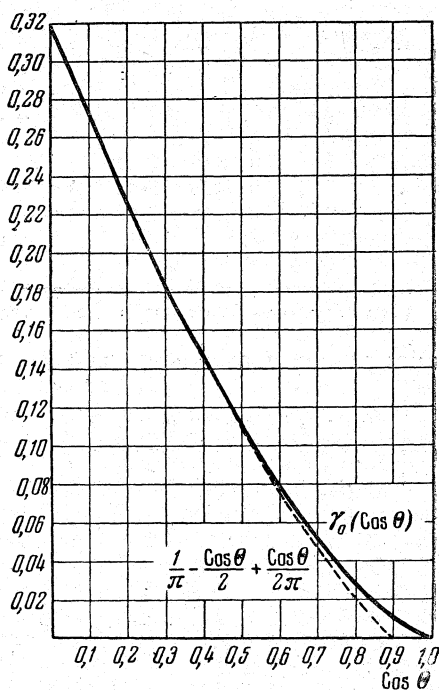


Рис. 5. График функции  $\gamma_0(\cos \theta)$  и его аппроксимация

Отсюда следует, что крутизна характеристики  $\Delta(y)$  зависит от величины начального угла отсечки  $\theta_{\text{нач}}$

$$\cos \theta_{\text{нач}} = z = \frac{E_0}{U_{\text{к}}}$$

и от величины реактивной составляющей рабочего напряжения  $x = \frac{U_x}{U_{\text{к}}}$ .

При  $y \rightarrow 0$ ,  $x \rightarrow 0$ ,  $z \rightarrow 0$  выражение (17) принимает вид:

$$\Delta = \frac{2}{\pi} \frac{y}{\frac{R_i}{2R_{\text{н}}} + 1} \quad \text{или} \quad I_{\text{н}} \cdot R_{\text{н}} = \frac{2}{\pi} \frac{U_a}{\frac{R_i}{2R_{\text{н}}} + 1}. \quad (19)$$

Следует отметить, что формула (19) совпадает с формулами, выведенными другими авторами, при условии  $\frac{U_{\text{р}}}{U_{\text{к}}} \rightarrow 0$ .

Таким образом, в результате проведенного исследования основной формулы кольцевого детектора (17) установлено следующее.

1. Формула (1) точна лишь в частном случае, когда

$$\frac{U_{\text{р}}}{U_{\text{к}}} \rightarrow 0 \quad \text{и} \quad \frac{E_0}{U_{\text{к}}} \rightarrow 0.$$

2. В общем случае имеет место зависимость выпрямленного тока не только от активной составляющей рабочего напряжения  $U_a$ , но также от реактивной составляющей  $U_x$ .

3. При  $\frac{R_{\text{н}}}{R_i} \neq 0$  имеет место нелинейность в зависимости выпрямленного тока от активной составляющей рабочего напряжения  $I_{\text{н}}(U_a)$ .

4. Выведенная общая формула (17) позволяет установить необходимую величину коммутирующего напряжения  $U_{\text{к}}$ , при которой влияние реактивной составляющей рабочего напряжения  $U_x$  и нелинейность характеристики  $I_{\text{н}}(U_a)$  имеют допустимое значение.

### 3. Входные сопротивления

На рис. 6 изображена временная диаграмма работы вентилях кольцевой схемы с нагрузкой, зашунтированной емкостью для общего случая

$$E_0 \neq 0, \quad U_x \neq 0 \quad \text{и} \quad \frac{R_{\text{н}}}{R_i} \neq 0.$$

Имеется несколько участков, различающихся числом одновременно работающих вентилях. Для каждого из участков можно составить свое выражение для входного сопротивления со стороны генераторов рабочего и коммутирующего напряжений, причем переход с одного участка на другой происходит без скачков в значениях входных сопротивлений. На каждом из этих участков имеет место существенная нелинейность входных сопротивлений. Интересно заметить, что в некоторых случаях входное сопротивление со стороны генератора рабочего напряжения отрицательно, т. е. генератор коммутирующего напряжения отдает часть своей мощности генератору рабочего напряжения.

Для оценки мощности, потребляемой от генераторов рабочего и коммутирующего напряжений, следует обратиться к входным сопротивле-



ниям детектора, определяемым по первой гармонике тока:

$$z_{1 \text{ вх}} = \frac{\bar{U}}{\bar{I}_1} = z_{1 \text{ вх}} e^{j\psi}. \quad (20)$$

Тогда при известном  $\bar{I}_1$  мощность, потребляемая от генераторов, может быть определена по обычной формуле

$$P = \frac{1}{2} \frac{U^2}{|z_{1 \text{ вх}}|} \cos \psi. \quad (21)$$

Определим величины входных сопротивлений для генераторов рабочего и коммутирующего напряжений.

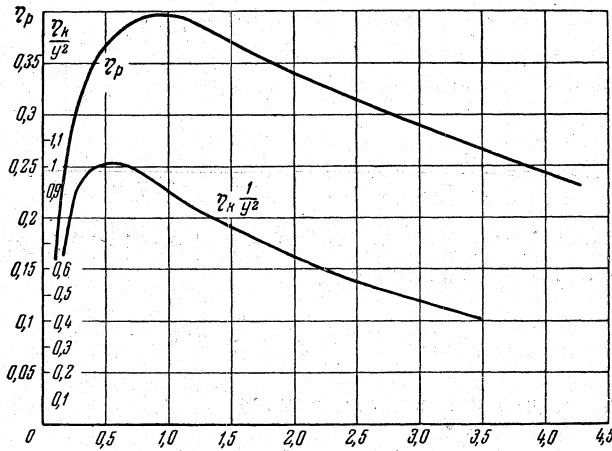


Рис. 6

*Входное сопротивление для генератора рабочего напряжения.* При идеальном трансформаторе с коэффициентом трансформации между первичной и половиной вторичной обмотки  $n=1$ , входное сопротивление между клеммами  $P_1P_2$  (рис. 2) можно определить по формуле

$$z_{1 \text{ вх}} = \frac{\bar{U}_p}{\bar{I}_{17} - \bar{I}_{18}}, \quad (22)$$

где  $I_{17}$  и  $I_{18}$  — амплитуды первых гармоник токов  $i_7$  и  $i_8$ , протекающих во вторичной обмотке трансформатора (рис. 4а).

Из векторной диаграммы рис. 4б и схемы 4а нетрудно получить следующие соотношения:

$$\bar{I}_{17} = \bar{I}_{11} - \bar{I}_{12}, \quad \bar{I}_{18} = \bar{I}_{13} - \bar{I}_{14}, \quad \bar{I}_{11} = -\bar{I}_{13}, \quad \bar{I}_{12} = -\bar{I}_{14},$$

где  $I_{1n}$  — ток первой гармоники вентиля, определяемый по обычной формуле через амплитуду напряжения на вентиле и функцию его угла отсечки  $\gamma_1(\theta_n)$  [6]:

$$I_{1n} = \frac{1}{R_i} \bar{U}_n \gamma_1(\theta_n).$$

После подстановки этих выражений в (22) получаем

$$\bar{z}_{1 \text{ вх р}} = \frac{R_i}{2} \frac{\bar{U}_p}{[\bar{U}_1 \gamma_1(\theta_1) - \bar{U}_2 \gamma_1(\theta_2)]}. \quad (23)$$

Можно раскрыть это выражение, представив напряжения  $\bar{U}_1$  и  $\bar{U}_2$  в виде векторной суммы рабочего и коммутирующего напряжений и определив углы отсечки вентиля. В итоге получим выражение, определяющее входное сопротивление как функцию основных параметров и сопротивлений в схеме:

$$z_{1 \text{ вх р}} = f\left(R_i; \frac{R_H}{R_i}; \frac{U_x}{U_H}; \frac{U_a}{U_H}\right).$$

Это выражение показывает, что при наличии реактивной составляющей рабочего напряжения  $U_x$  входное сопротивление  $z_{1 \text{ вх р}}$  имеет комплексный характер.

В частном случае, когда  $U_x = 0$ , учитывая обозначения (6), имеем

$$U_{1,2} = U_H \pm U_a = U_H(1 \pm y).$$

Подставив эти выражения в (23), получим

$$R_{\text{вх р}} = \frac{R_i}{2} \frac{y}{(1+y)\gamma_1(\cos\theta_1) - (1-y)\gamma_1(\cos\theta_2)}. \quad (24)$$

Как известно [6], функция  $\gamma_1(\cos\theta_1)$  при  $|\cos\theta| < 0,5$  хорошо аппроксимируется следующим выражением:

$$\gamma_1(\cos\theta) = \frac{1}{2} - \frac{2}{\pi} \cos\theta. \quad (25)$$

Из (9) следует, что для нашего случая

$$\cos\theta_{1,2} = \frac{z \pm \Delta}{1 \pm y}. \quad (26)$$

Произведя подстановку (26) и (25) в (24), имеем

$$R_{\text{вх р}} = \frac{R_i}{2} \frac{y}{y - \frac{4}{\pi} \Delta}. \quad (27)$$

Из (17) получим выражение для  $\Delta$  при  $x = 0$  и после его подстановки в (27) имеем

$$R_{\text{вх р}} = \frac{R_i}{2} \left( 4 - \frac{8}{\pi^2} \frac{1 - \frac{z^2}{2} - \frac{4y^2}{\pi^2} \left(1 + \frac{R_i}{2R_H}\right)^{-2}}{1 + \frac{R_i}{2R_H} - \frac{2}{\pi} z} \right)^{-1} \quad (28)$$

В частном случае при  $R_H \rightarrow \infty$  и  $z = 0$ ,  $y \rightarrow 0$  получаем

$$R_{\text{вх р}} = \frac{R_i}{2} \frac{1}{1 - \frac{8}{\pi^2}} \approx 2,5R_i.$$

Здесь уместно подчеркнуть, что наличие емкости, шунтирующей нагрузку, существенно меняет входное сопротивление  $R_{\text{вх р}}$ . Действительно, при аналогичных условиях из формулы, выведенной в [3] для случая чисто активной нагрузки, получаем, что кольцевой детектор при  $R_H \rightarrow \infty$  имеет бесконечно большое входное сопротивление  $R_{\text{вх р}} \rightarrow \infty$ .

*Входное сопротивление со стороны генератора коммутирующего напряжения.* Входное сопротивление между клеммами  $K_1 K_2$  (рис. 2) при

идеальном трансформаторе ( $n = 1$ ) определяется следующим образом:

$$z_{1 \text{ вх к}} = \frac{\bar{U}_k}{\bar{I}_{16} - \bar{I}_{15}},$$

где  $\bar{I}_{16}$  и  $\bar{I}_{15}$  — амплитуды первых гармоник токов во вторичной обмотке трансформатора (рис. 4а). Выразив эти токи через токи первых гармоник вентиляей, имеем

$$z_{1 \text{ вх к}} = \frac{\bar{U}_k}{2(\bar{I}_{11} - \bar{I}_{12})} = \frac{\bar{U}_k}{2[\bar{U}_1 \gamma_1(\theta_1) + \bar{U}_2 \gamma_1(\theta_2)]}.$$

Проведя в знаменателе преобразования, аналогичные преобразованиям при выводе основной формулы детектора  $\Delta(y)$  (17), при аппроксимации  $\gamma_1(\theta)$  выражением (25) получим

$$z_{1 \text{ вх к}} = R_{i \text{ вх к}} = \frac{R_i}{2\left(1 - \frac{z}{\pi}\right)}. \quad (29)$$

Это соотношение выведено без учета членов, содержащих

$$c_n x^k y^l z^m,$$

где  $c_n < 1$ ,  $k, l, m$  — целые числа, равные нулю или больше нуля, причем

$$k + l + m \geq 2.$$

#### 4. К. п. д. и оптимальные соотношения в схеме детектора

Из приведенного анализа основной формулы детектора следует, что увеличение коммутирующего напряжения улучшает работу схемы, приближая ее к идеальному фазовому детектору, выходное напряжение которого определяется формулой (1). Но при этом увеличивается мощность, отдаваемая генератором коммутирующего напряжения.

Под к. п. д. будем понимать отношение выходной полезной мощности к сумме мощностей, затрачиваемых на питание коммутирующей и рабочей обмоток детектора:

$$\eta = \frac{P_{\text{в}}}{P_{\text{к}} + P_{\text{р}}} = \frac{I_{\text{в}}^2 R_{\text{к}}}{\frac{U_{\text{к}}^2}{2R_{1 \text{ вх к}}} + \frac{U_{\text{р}}^2}{2R_{1 \text{ вх р}}}}. \quad (30)$$

Обычно полезная мощность в нагрузке считается заданной. Поэтому такой коэффициент полностью характеризует необходимую мощность переменного тока на его входе при заданной отдаче тока (или мощности) на выходе.

В тех случаях, когда источники коммутирующего и рабочего напряжений резко отличны и стоимости единицы их энергии несоизмеримы, целесообразно учитывать отдельно отношения

$$\eta_{\text{к}} = \frac{P_{\text{в}}}{P_{\text{к}}} \quad (31)$$

и

$$\eta_{\text{р}} = \frac{P_{\text{в}}}{P_{\text{р}}}. \quad (32)$$

Рассмотрим выражение (30) для общего к. п. д. схемы.

Подставив в формулу (30) значения входных сопротивлений (28) и (29) для случая  $z \rightarrow 0$  и  $x \rightarrow 0$ , получаем

$$\eta = \frac{\frac{4}{\pi^2} \frac{1}{1 + \frac{R_i}{2R_H}}}{\frac{1}{y^2} \frac{R_i}{2R_H} + \frac{1}{R_H} \left[ 1 - \frac{8}{\pi^2} \frac{1}{1 + \frac{R_i}{2R_H}} \right]} \quad (33)$$

Если величина  $y$  задана, исходя из допустимой нелинейности характеристики  $I_=(U_a)$  или исходя из допустимого влияния реактивной составляющей  $U_x$ , для нахождения оптимального соотношения в схеме  $\left(\frac{R_i}{2R_H}\right)_{\text{опт}}$  нужно исследовать выражение (33) на максимум. Вычислительные трудности при этом можно обойти, если рассматривать случай работы схемы  $y = \frac{U_a}{U_K} < 0,3$ . Как уже указывалось, схема кольцевого детектора обычно удовлетворяет такому условию, поскольку только в этом случае реальный детектор приближается к идеальному. Нетрудно видеть, что при  $y < 0,3$  вторым членом знаменателя можно пренебречь по малости, что равносильно допущению, что  $P_p = 0$ , т. е.

$$\eta = \eta_K \frac{4}{\pi^2} \frac{y^2 \frac{R_i}{2R_H}}{\left(1 + \frac{R_i}{2R_H}\right)^2}$$

График функции  $\eta_K\left(\frac{R_i}{2R_H}\right)$  при различных  $y$  представлен на рис. 6.

Максимум  $\eta_K$  получается при  $\frac{R_i}{R_H} = 2$ .

Нетрудно объяснить существование оптимального  $R_i$ : при малых  $R_i$  мощность, потребляемая от генератора коммутирующего напряжения, велика, так как  $P_K \approx \frac{U_K^2}{R_i}$ . При больших  $R_i$  эта мощность опять возрастает, так как для обеспечения нужного тока необходимы большие напряжения  $U_a$  и при постоянном  $y = \frac{U_a}{U_K}$  соответственно должно возрасти коммутирующее напряжение.

Следует заметить, что в большинстве случаев величина внутреннего сопротивления вентилей меньше, чем его оптимальная величина. В этом случае следует последовательно с вентилем включать дополнительное сопротивление

$$R_{\text{доп}} = 2R_H - R_i.$$

Включение такого сопротивления стабилизирует характеристику вентилей, что в конечном счете увеличивает постоянство показаний детектора при изменении внешних условий (изменение накала в диодах или изменение температуры и влажности при применении селеновых или купроксных вентилей).

Рассмотрим теперь выражение (32) для к. п. д. схемы  $\eta_p$ , определяемого по мощности в рабочей диагонали детектора. Подставив в (32)

значение входного сопротивления  $R_{вх\ p}$  (для случая  $z \rightarrow 0$ ,  $x \rightarrow 0$ ,  $y \rightarrow 0$ ), получаем

$$\eta_p = \frac{\frac{4}{\pi^2} \frac{1}{\left(1 + \frac{R_i}{2R_H}\right)^2}}{\frac{R_i}{R_H} \left[1 - \frac{8}{\pi^2} \frac{1}{1 + \frac{R_i}{2R_H}}\right]}$$

После простейших преобразований имеем

$$\eta_p = \frac{4}{\pi} \frac{1}{\left(1 + \frac{R_i}{2R_H}\right) \left(1 + \frac{R_i}{2R_H} - \frac{8}{\pi^2} \frac{R_i}{R_H}\right)}$$

График функции  $\eta_p \left(\frac{R_i}{R_H}\right)$  представлен на рис. 6. Максимум получается при  $\frac{R_i}{R_H} = 1$ .

Из графиков рис. 6 следует, что области максимумов  $\eta_p$  и  $\eta_k$  несколько расходятся. В зависимости от стоимости единицы энергии и источников рабочего и коммутирующего напряжений следует выбирать соотношение  $R_i/R_H$  в пределах от 1 до 2.

### 5. Экспериментальная проверка основной формулы

Основная формула детектора (17) проверялась экспериментально в установке, схема которой показана на рис. 7.

Установка состоит из звукового генератора, моста, усилителя с катодным выходом и исследуемого детектора. Звуковой генератор питает коммутирующую диагональ детектора и мост. Рабочая диагональ детектора питается с выхода усилителя. Мост и усилитель позволяют получить рабочее напряжение любой величины и фазы.

На установке исследовалось влияние нагрузки на линейность характеристики выпрямления  $I_{\text{пр}}(U_a)$  и влияние реактивной составляющей рабочего напряжения  $U_x$  на ее крутизну.

В соответствии с изложенной теорией реактивная составляющая рабочего напряжения  $U_x$  уменьшает величину выпрямленного тока. Уменьшение тока под действием  $U_x$  может быть оценено по следующей формуле:

$$\delta_x = \frac{I_{U_x=0} - I_{U_x \neq 0}}{I_{U_x=0}} \quad (34)$$

Формула (17) позволяет определить  $\delta_x$  следующим образом:

$$\delta_x = 1 - \frac{x^2}{2}$$

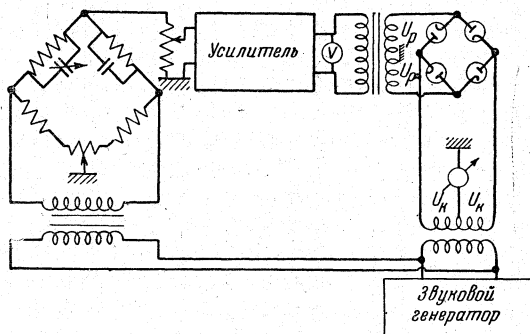


Рис. 7

График этой функции нанесен на рис. 8,а сплошной линией. В описываемом опыте при помощи прибора, установленного на выходе детектора, дважды отмечалась величина выходного тока при отсутствии и при наличии реактивной составляющей рабочего напряжения. Относительное изменение тока, вычисленное в процентах по формуле (34), представлено в виде пунктирной линии на графике рис. 8,а.

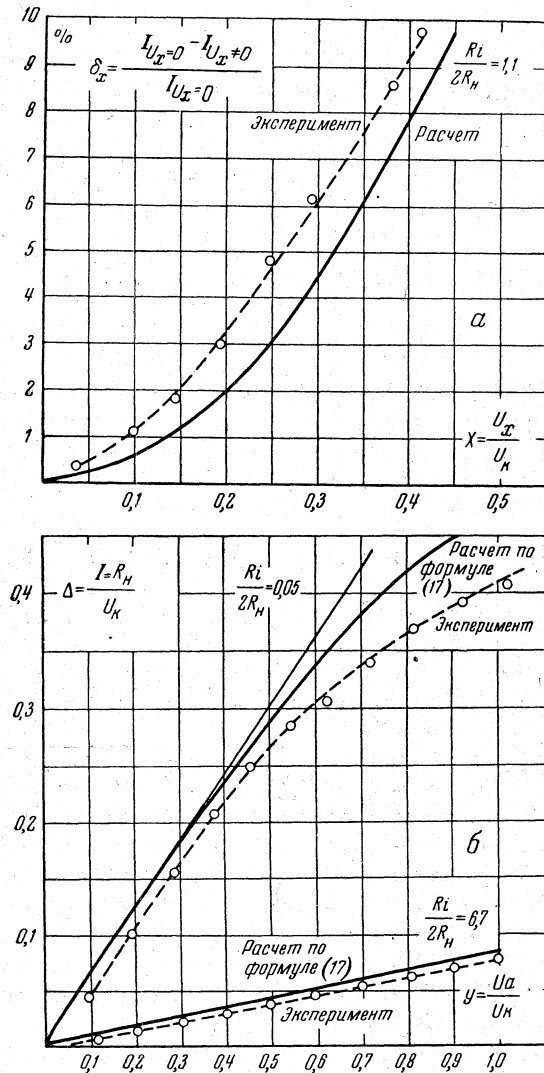


Рис. 8

Как следует из рис. 8,а, экспериментальные кривые хорошо совпадают с теоретическими — расчетными — кривыми.

На рис. 8,б проведено сравнение экспериментально снятых зависимостей  $J_=(U_a)$  с расчетными [формула 17]. При малом значении сопротивления нагрузки их совпадение достаточно полное. При большом сопротивлении нагрузки ( $\frac{R_i}{2R_n} = 0,05$ ) в области больших  $y$  между указанными графиками имеется значительное расхождение. Это может быть объяснено тем, что все теоретические зависимости выведены в предположении малой величины  $y = \frac{U_a}{U_n}$ . В области значений  $y < 0,5$

совпадение экспериментальных и расчетных кривых получилось вполне удовлетворительным.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Упрощенный вывод основной формулы (17)

Имеем:

$$\frac{\Delta R_i}{2R_H} = A_1 \gamma_0(\cos \theta_1) - A_2 \gamma_0(\cos \theta_2); \quad (\text{А})$$

$$\cos \theta_{1,2} = \frac{z \pm \Delta}{A_{1,2}}; \quad (\text{Б})$$

$$A_{1,2} = (1 \pm y) \sqrt{1 + \frac{y^2}{(1 \pm y)^2}}; \quad (\text{В})$$

$$\gamma_0(\cos \theta) = \frac{1}{\pi} - \frac{\cos \theta}{2} + \frac{\cos^2 \theta}{2\pi}. \quad (\text{Г})$$

Подставляя (Г) и (Б) в (А), получаем

$$\frac{\Delta R_i}{2R_H} = \frac{A_1 - A_2}{\pi} - \Delta - \frac{1}{2\pi} \frac{(z^2 + \Delta^2)(A_1 - A_2) - 2z\Delta(A_1 + A_2)}{A_1 A_2},$$

$$\Delta \left[ 1 + \frac{R_i}{2R_H} - \frac{z}{\pi} \frac{A_1 - A_2}{A_1 A_2} \right] = \frac{A_1 - A_2}{\pi} \left[ 1 - \frac{\Delta^2 + z^2}{2A_1 A_2} \right]. \quad (\text{Д})$$

Учитывая члены  $c$ ,  $x^m$ ,  $y^n$ ,  $z^l$ , у которых сумма показателей степени  $m + n + l < 4$ , имеем следующие выражения:

$$A_1 + A_2 = 2 \left( 1 + \frac{x^2}{2} \right),$$

$$A_1 - A_2 = 2y \left( 1 - \frac{x^2}{2} \right), \quad (\text{Е})$$

$$A_1 A_2 = \left( 1 + \frac{x^2}{2} \right)^2 (1 - y^2) = 1 + x^2 - y^2.$$

Подставляем (Е) в (Д):

$$\Delta \left[ 1 + \frac{R_i}{2R_H} - \frac{z}{\pi} \frac{2 \left( 1 + \frac{x^2}{2} \right)}{1 + x^2 - y^2} \right] = \frac{2y \left( 1 - \frac{x^2}{2} \right)}{\pi} \left[ 1 - \frac{\Delta^2 + z^2}{2 \left( 1 + x^2 - y^2 \right)} \right]. \quad (\text{Ж})$$

Получилось квадратное уравнение относительно искомой величины  $\Delta$ .

Уравнение можно решить приближенно, определив сначала  $\Delta_{\text{приб}}$  без учета члена, содержащего  $\Delta^2$ , а затем подставив в уравнение (Ж) вместо  $\Delta^2$  величину  $\Delta_{\text{приб}}^2$ . Ошибка будет меньше членов, у которых  $m + n + l < 4$ :

$$\Delta_{\text{приб}} = \frac{\frac{2y}{\pi} \left( 1 - \frac{x^2}{2} \right) \left( 1 - \frac{z^2}{2 \left( 1 + x^2 - y^2 \right)} \right)}{1 + \frac{R_i}{2R_H} - \frac{z}{\pi} \frac{2 \left( 1 + \frac{x^2}{2} \right)}{1 + x^2 - y^2}} \approx \frac{\frac{2y}{\pi} \left[ 1 - \frac{x^2}{2} - \frac{z^2}{2} \right]}{1 + \frac{R_i}{2R_H} - \frac{z}{\pi} \frac{2 \left( 1 - \frac{x^2}{2} + y^2 \right)}{1 + x^2 - y^2}}.$$

Подставляем  $\Delta_{\text{приб}}^2$  вместо  $\Delta^2$  в (Ж). Для этого определяем  $\Delta_{\text{приб}}^2$ :

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{приб}}^2 &= \frac{\frac{4y^2}{\pi^2} [1 - x^2 - z^2]}{\left(1 + \frac{R_i}{2R_H}\right)^2 - \left(1 + \frac{R_i}{2R_H}\right) \frac{4z}{\pi} \left(1 - \frac{x^2}{2} + y^2\right)} = \\ &= \frac{4y^2}{\pi^2 \left(1 + \frac{R_i}{2R_H}\right)^2 \left[1 - \frac{4z}{\pi \left(1 + \frac{R_i}{2R_H}\right)}\right]} = \frac{4y^2}{\pi^2 \left(1 + \frac{R_i}{2R_H}\right)^2} + \\ &+ \frac{16y^2 z}{\pi^3 \left(1 + \frac{R_i}{2R_H}\right)} = \frac{4y^2}{\pi^2 \left(1 + \frac{R_i}{2R_H}\right)^2}. \end{aligned}$$

Членом  $\frac{16y^2 z}{\pi^3 \left(1 + \frac{R_i}{2R_H}\right)}$  можно пренебречь, так как в выражении (Ж) при подстановке  $\Delta_{\text{приб}}^2 = \Delta^2$  в последний член уравнения (Ж):

$$\begin{aligned} \Delta \left[1 + \frac{R_i}{2R_H} - \frac{z}{\pi} 2 \left(1 - \frac{x^2}{2} + y^2\right)\right] &= \frac{2y \left(1 - \frac{x^2}{2}\right)}{\pi} \left[1 - \frac{\frac{4y^2}{\pi^2 \left(1 + \frac{R_i}{2R_H}\right)^2}}{2 \left(1 + x^2 - y^2\right)}\right], \\ \Delta \left[1 + \frac{R_i}{2R_H} - \frac{2z}{\pi} \left(1 - \frac{x^2}{2} + y^2\right)\right] &= \frac{2y \left(1 - \frac{x^2}{2}\right)}{\pi} \left[1 - \frac{2y^2}{\pi^2 \left(1 + \frac{R_i}{2R_H}\right)^2} - \frac{z^2}{2}\right], \\ \Delta \left[1 + \frac{R_i}{2R_H} - \frac{2z}{2} \left(1 - \frac{x^2}{2} + y^2\right)\right] &= \frac{2y \left[1 - \frac{x^2}{2} - \frac{z^2}{2} - \frac{2y^2}{\pi^2 \left(1 + \frac{R_i}{2R_H}\right)^2}\right]}{\pi}, \\ \Delta &= \frac{2y \left[1 - \frac{x^2}{2} - \frac{z^2}{2} - \frac{2y^2}{\pi^2 \left(1 + \frac{R_i}{2R_H}\right)^2}\right]}{1 + \frac{R_i}{2R_H} - \frac{2z}{\pi} \left(1 - \frac{x^2}{2} + y^2\right)}. \end{aligned}$$

В результате преобразований получаем формулу (17)

$$\Delta = \frac{2y \left[1 - \frac{x^2}{2} - \frac{z^2}{2} - \frac{2y^2}{\pi^2 \left(1 + \frac{R_i}{2R_H}\right)^2}\right]}{1 + \frac{R_i}{2R_H} - \frac{2z}{\pi}}$$

Поступила в редакцию  
20 сентября 1954 г.

#### Цитированная литература

1. Иноземцев С. Н. Детекторные вектомерные устройства и их расчет. Электричество, № 10, 1950.
2. Туричин А. М. Электрические измерения неэлектрических величин. Госэнергоиздат, 1951.
3. Житомирский В. Н. Линейная теория кольцевого фазового детектора. Радиотехника, № 3, 1952.
4. Вальтер С. Н. Über neue Gleichrichtermeßanordnung, ZFTP, № 8, 1932.
5. Темников Ф. Е. и Харченко Р. Р. Электрические измерения неэлектрических величин. Госэнергоиздат, 1948.
6. Евтянов С. И. Радиопередающие устройства. Связьиздат, 1950.
7. Баев и Егоров. Основы дальней связи. Связьиздат, 1948.