

Ответ на письмо В. Д. Иванченко

В статье [1] было отмечено, что в работе [5] не учтена «внутренняя» нелинейная обратная связь, обусловленная наличием нелинейного сопротивления коллекторного перехода транзистора r_k , и нечетко разделены составляющие искажений, вносимых входной (пассивной) и активной цепью транзистора, поскольку примененный в [5] параметр $g_{21} = \beta/r_{11}$ является «сквозным» параметром. Наши замечания основывались на следующем:

В [5] исходная формула коэффициента передачи усилителя с ОЭ имеет следующий вид:

$$K = \frac{r_{11}}{R_c + r_{11}} - \frac{R_c}{R_n + r_{22}} \cdot g_{21} \cdot r_{22}. \quad (1)$$

Согласно методике определения зависимости $r_{22}(U_{бэ})$, приведенной в [5] на стр. 35, под r_{22} понимается выходное сопротивление транзистора с ОЭ, т. е.

$$r_{22} = \frac{r_k}{1 + \beta}.$$

Но при таком значении r_{22} выражение (1) неверно. Как показано*, формула (1) справедлива, если под r_{22} понимать следующее:

$$r'_{22} = \frac{r_k}{1 + \beta} \cdot \frac{r_{э}(1 + \beta) + r_6 + R_c}{r_{э} + r_6 + r_c}.$$

Отсюда видно, что $r'_{22} \rightarrow r_{22}$ только при $R_c \gg r_{э}(1 + \beta) + r_6$, а автор [5] распространяет полученные результаты на любые значения R_c . Использование в качестве исходного соотношения (1) привело к тому, что в [5] «внутренняя» обратная связь через нелинейное сопротивление r_k совершенно не учтена, что значительно искажает реальную картину возникновения нелинейных искажений.

Выбор системы параметров и форма представления результата является собственным делом каждого автора, если при этом делаются обоснованные выводы.

*) М. С. Ройтман, В. М. Сергеев. Некоторые вопросы анализа и рационального построения транзисторных усилителей с эмиттерной обратной связью по напряжению. «Автоматика», 1971, № 6.

К каким же выводам пришел автор письма в работе [5]? Им получено соотношение для параметра нелинейности по второй гармонике в виде

$$H_2 \simeq \frac{r'_{11}}{r_{11}} (1 - K_1) - \frac{g'_{21}}{g_{21}}. \quad (2)$$

Автор [5] утверждает без всяких оговорок и доказательств, что знаки r'_{11} и g'_{21} противоположны, что свидетельствует о возможности полной или частичной компенсации искажений по второй гармонике. Легко показать, что противоположность знаков r'_{11} и g'_{21} имеет место только при вполне определенных условиях.

Автору письма известно соотношение $g_{21} = \beta/r_{11}$, из которого следует, что $g'_{21}/g_{21} = \beta'/\beta - r'_{11}/r_{11}$, или, учитывая, что $r'_{11} < 0$, $g'_{21}/g_{21} = \pm \beta'/\beta + r'_{11}/r_{11}$. Очевидно, что знак g'_{21}/g_{21} зависит от знака β' , который может быть как положительным, так и отрицательным. Таким образом, компенсация возможна не всегда, что автором [5] не уточняется. Отмечая тем не менее возможность компенсации, автор [5] не рекомендует практически выполнять условие полной компенсации, "... так как оно выполняется в области малых! токов коллектора, где коэффициент усиления не превышает нескольких единиц".

Покажем абсолютную неверность этого вывода, сделанного кстати без всяких доказательств. Подставив значение g'_{21}/g_{21} в (2) с учетом $r'_{11} < 0$, получим

$$H_2 \simeq \left| \frac{r'_{11}}{r_{11}} \cdot K_1 \right| + \frac{\beta'}{\beta}. \quad (3)$$

Хорошо видно, что компенсация возможна лишь при $\beta' < 0$, что имеет место в области больших! токов, где наблюдается уменьшение β при увеличении тока коллектора. Указанный эффект компенсации в области больших токов является действенным средством линеаризации мощных транзисторных усилителей, и очень плохо, что ложные выводы автора [5] могут ввести разработчиков в заблуждение. В то же время у современных высокочастотных транзисторов имеет место слабая зависимость $\beta(i_K)$, т. е. $\beta' \simeq 0$, а $\beta' < 0$ в области токов, превышающих номинальные. При этом компенсация, согласно [5], вообще невозможна.

В то же время наличие внутренней нелинейной обратной связи через r_K приводит, как показано в [1], к возможности компенсации и при $\beta' \geq 0$.

В нашей статье [1] конечный результат имеет вид

$$K_2 = \frac{U_1}{F} \left[(1 - \gamma_1) \left(\frac{1}{2} \frac{\beta'}{\beta} - \left| \frac{r'_K}{r_K} \right| \frac{\beta R_n}{r_K} + \frac{1}{2} \gamma_1 \left| \frac{r'_\varepsilon}{r_\varepsilon} \right| \right] \right]. \quad (4)$$

Здесь четко выделены составляющие искажений, вносимых входной $r'_\varepsilon/r_\varepsilon$ и выходной цепью (β' , r'_K), а также легко усматривается возможность компенсации как при $\beta' < 0$, так и при $\beta' \geq 0$.

Относительно записи $U_2 = \int \gamma_2(U'_2) dU'_2$ и сопутствующих этой записи выводов, сделанных в [1] со ссылкой на [5], то, действительно, такого соотношения в работе [5] нет и оно приведено нами ошибочно, чему способствовала нечеткость обозначений, принятых в [5], а именно, имеется запись:

$$K_1 = \frac{r_{11}}{r_{11} + R_C} \text{ и } K(t) = \frac{r_{11}(t)}{r_{11}(t) + R_C},$$

в то же время

$$K_2 = \frac{R_n}{r_{22} + R_n}, \text{ а } K_2(t) = \frac{R_n}{r_{22}(t) + R_n} \cdot g_{21}(t) \cdot r_{22}(t)?$$

Тем не менее это не освобождает нас от необходимости принести свои извинения по этому поводу.

Автор письма ставит под сомнение основное соотношение, полученное нами в [1], поскольку ему не удалось привести его к виду

$$K_{2Г} = \frac{1}{4} \frac{g_{21}^1}{g_{21}} U_1 \text{ (при } R_n = 0, R_c = 0).$$

Из логики анализа [1] следует, что коэффициент K_2 , представленный выражением (4), представляет «частный» коэффициент второй гармоники и выражает погрешность коэффициента передачи от нелинейности. Таким образом, мгновенный коэффициент передачи усилителя имеет вид (без учета частных коэффициентов третьей и выше гармоники)

$$K(U_1) = K_0 [1 + K_2(U_1) + \dots].$$

Отсюда $U_2 = U_1 \cdot K(U_1) = K_0 U_1 + K_2(U_1) U_1$. Подставляя сюда значение $K_2(U_1)$ из (4) и $U_1 = U_{1m} \cos \omega t$, легко получить, что истинный коэффициент второй гармоники будет равен

$$K_{2Г} = \frac{1}{2} K_2. \quad (5)$$

При $R_c = R_n = 0$ с учетом (5) получим, согласно обозначений, принятых в [1]:

$$K_{2Г} = \frac{1}{4} \left[\frac{r_6}{r_6 + r_{\text{э}} \beta} \cdot \frac{\beta'}{\beta} + \frac{r_{\text{э}} \beta}{r_6 + r_{\text{э}} \beta} \left| \frac{r'_{\text{э}}}{r_{\text{э}}} \right| \right] U_{1m}. \quad (6)$$

Поскольку $g_{21} \simeq \beta / [r_{\text{э}} \beta + r_6]$, а в работе [1] r_6 считалось линейным, то с учетом $r_{\text{э}} < 0$

$$\frac{g_{21}^1}{g_{21}} = \frac{r_6}{r_{\text{э}} \beta + r_6} \cdot \frac{\beta'}{\beta} + \frac{r_{\text{э}} \beta}{r_{\text{э}} \beta + r_6} \left| \frac{r'_{\text{э}}}{r_{\text{э}}} \right|, \quad (7)$$

подставляя (7) в (6), получаем

$$K_{2Г} = \frac{1}{4} U_{1m} \frac{g_{21}^1}{g_{21}}, \text{ что и требовалось доказать. Поскольку качествен-}$$

ная картина не зависит от цифрового коэффициента, а приведенные преобразования очевидны, то мы специально на этих моментах в [1] не останавливались.

Итак, все претензии автора письма за исключением п. 3 являются, на наш взгляд, необоснованными и нам остается лишь выразить сожаление, что т. Иванченко В. Д. не пожелал ограничиться личной перепиской и потребовал вынесения своего письма на дефицитные страницы журнала.

С уважением В. М. Сергеев

