

## ОБ УСТОЙЧИВОСТИ АМПЛИТУДНО-СТАБИЛЬНЫХ АВТОГЕНЕРАТОРОВ С ИНЕРЦИОННЫМИ УПРАВЛЯЕМЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

М. С. РОЙТМАН

(Представлена научным семинаром кафедры радиотехники)

В [1, 2] были предложены генераторы, напряжение на выходе которых стабилизировано воздействием управляемых инерционных элементов (УИЭ) на цепь обратной связи (ОС) задающего генератора. Структурная схема такого генератора с совместным воздействием отрицательной и положительной ОС приведена на рис. 1, где

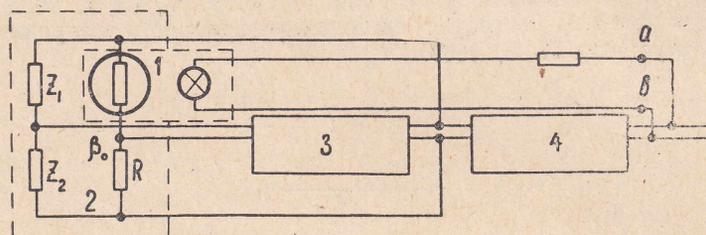


Рис. 1.

- 1 — управляемый инерционный элемент, линейный для мгновенных значений напряжения;
- 2 — цепи положительной ( $\beta_n$ ) и отрицательной ( $\beta_0$ ) обратной связи;
- 3 — усилитель задающего генератора;
- 4 — усилитель мощности.

Относительное влияние нестабильности  $m$ -го узла генератора на выходное напряжение может быть определено по формуле

$$G_{\lambda_{\text{связи}}}^{U_{\text{вых}}} = \frac{G_{\lambda}^{U_{\text{вых}}}}{1 - G_{U_{\text{вх}}}^{U_{\text{вых}}}} = \frac{\prod_{i=m}^n G_i}{1 - \prod_{i=1}^n G_i} = \frac{G_{\lambda}^{U_{\text{вых}}}}{G_{\text{ст}}}, \quad (1)$$

где  $G_{\lambda}^{U_{\text{вых}}} = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{U_{\text{вых}}} / \frac{\Delta \lambda}{\lambda}$  — влияние относительной нестабильности  $m$ -го узла в разомкнутой системе (разрывается в т.  $a - b$ );  
 $G_{\text{ст}}$  — коэффициент стабилизации в замкнутой системе;

$$G_{U_{\text{ВХ}}}^{U_{\text{ВЫХ}}} = \frac{\frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}}}{\frac{\Delta U_{\text{АВ}}}{U_{\text{АВ}}}} \text{ — относительный коэффициент передачи раз-}$$

зомкнутой системы;

$G_i$  — относительный коэффициент передачи  $i$ -го узла.

Из (1) следует, что при  $G_{\text{см}} \gg 1$  наибольшее влияние на выходное напряжение оказывает 1-й узел. Влияние последующих ослаблено в  $G_1$  раз. Поэтому необходимо стремиться к тому, чтобы коэффициент передачи первого узла и его «помехозащищенность» были максимальны. Генераторы, удовлетворяющие указанным требованиям в [3], отнесены к категории идеальных. При применении высокостабильных УИЭ с  $G_1 \gg 1$  сказанное целиком относится к генераторам, выполненным по структурной схеме рис. 1.

К сожалению, практическая реализация таких генераторов затруднена из-за возникающей проблемы устойчивости. Причем чем выше требования к чистоте формы кривой генерируемого напряжения, тем с большими противоречиями приходится иметь дело. В силу важности затронутых вопросов рассмотрим их несколько подробнее и попытаемся найти приемлемые решения.

Разомкнем систему, приведенную на рис. 1, в точках  $a$ — $b$  и подадим на вход напряжение модулированное по огибающей

$$U_{\text{ВХ}}(t) = U[1 + a \sin \Omega t] \sin \omega t,$$

где

$a$  — относительная глубина модуляции,

$\Omega$  — частота модуляции.

Относительный коэффициент передачи разомкнутой системы (являющийся функцией частоты  $\Omega$ ) равен\*

$$G_{U_{\text{ВХ}}}^{U_{\text{ВЫХ}}}(\Omega) = G_{U_{\text{ВХ}}}^{R_{\text{Ф}}}(\Omega) G_{R_{\text{Ф}}}^{\beta}(\Omega) G_{\beta}^{\kappa}(\Omega) G_{\kappa}^{U'_{\text{ВЫХ}}}(\Omega) G_{U'_{\text{ВЫХ}}}^{U_{\text{ВЫХ}}}(\Omega). \quad (2)$$

$$G_{U_{\text{ВХ}}}^{R_{\text{Ф}}}(\Omega) = \frac{dR_{\text{Ф}}/R_{\text{Ф}}}{dU_{\text{ВХ}}/U_{\text{ВХ}}(\Omega)} = \frac{-G_{\text{Ф}}}{(1 + j\Omega\tau_{\text{Л}})(1 + j\Omega\tau_{\text{Ф}})},$$

де  $G_{\text{Ф}}$  — статический коэффициент передачи пары лампочка — фотосопротивление;

$\tau_{\text{Л}}$  — постоянная времени лампочки;

$\tau_{\text{Ф}}$  — постоянная фотосопротивления;

$$G_{R_{\text{Ф}}}^{\beta}(\Omega) = \frac{d\beta_0/\beta_0}{dR_{\text{Ф}}/R_{\text{Ф}}} \approx -(1 - \beta_0);$$

$$G_{\beta}^{\kappa}(\Omega) = \frac{d\kappa/\kappa}{d\beta_0/\beta_0} \approx (K\beta_n - 1) = K\beta_0.$$

Величину  $G_{\kappa}^{U'_{\text{ВЫХ}}}$  допустимо брать равной 1 только тогда, когда в цепь обратной связи включен безынерционный нелинейный элемент. Если же применен инерционный нелинейный элемент или УИЭ, то указанное допущение совершенно неправомерно. Это чрезвычайно важное обстоятельство, к сожалению, не принималось всеми, включая и А. А. Львовича, во внимание.

\* Мы всюду считаем, что крутизна фазочастотной характеристики всех регулируемых звеньев на частоте несущей пренебрежительно мала. Другими словами, ни одно из звеньев не является остроизбирательным. В противном случае могут возникнуть дополнительные неустойчивости. Их подробный анализ дан в [3].

Действительно, если  $\beta$ -цепи линейны для мгновенных значений напряжения, то любое малое и сравнительно быстрое изменение какого-либо параметра усилителя не приведет к срыву генерации только в случае нелинейности самого усилителя.

Примем аппроксимацию коэффициента передачи усилителя при подаче на его вход напряжения  $U_m \sin \omega t$  в виде

$$K[u(t)] = K_0 - K'' (U_m \sin \omega t)^2 = K_0 \left[ 1 - \frac{K''}{K_0} (U_m \sin \omega t)^2 \right].$$

Линеаризованное (осредненное) значение  $K(u)$  равно\*

$$K(u) = K_0 \left[ 1 - \frac{3}{4} \cdot \frac{K''}{K_0} U_m^2 \right]$$

и коэффициент 3-й гармоники усилителя равен

$$K_{3\Gamma} = \frac{1}{4} \cdot \frac{K''}{K_0},$$

$$\frac{dK(u)}{K} \approx -\frac{3}{2} \left( \frac{K''}{K_0} U_m^2 \right) \frac{dU_m}{U_m}$$

и

$$G_{\text{к}}^{U' \text{ Вых}}(\Omega) \approx -\frac{1}{\frac{3}{2} \left( \frac{K''}{K_0} U_m^2 \right)} \cdot \frac{1}{1 + j\Omega\tau_{\text{к}}},$$

где  $\tau_{\text{к}}$  — эквивалентная постоянная времени автогенератора.

Усилитель мощности можно считать линейным ( $G_{\text{У}}^{U' \text{ Вых}} = 1$ ), и следовательно,

$$G_{\text{У Вых}}^{U' \text{ Вых}}(\Omega) \approx -\frac{K\beta_0(1-\beta_0)G_{\text{Ф}}}{\frac{3}{2} \left( \frac{K''}{K_0} U_m^2 \right)} \cdot \frac{1}{(1 + j\Omega\tau_{\text{к}})(1 + j\Omega\tau_{\text{л}})(1 + j\Omega\tau_{\text{ф}})}. \quad (3)$$

На выходе получим напряжение с огибающей

$$a |G_{\text{У Вых}}^{U' \text{ Вых}}(\Omega)| \sin[\Omega t + \varphi_G(\Omega)].$$

Очевидно, что если  $|G_{\text{У Вых}}^{U' \text{ Вых}}(\Omega)| \geq 1$  при  $\varphi_G(\Omega) = 2n\pi$  ( $n=0, 1, 2, \dots$ ),

то замкнутая система неустойчива.

Замкнутая система будет устойчива, если

$$G_{\text{ст}}(\Omega) = 1 - G_{\text{У Вых}}^{U' \text{ Вых}}(\Omega) > 0$$

при любых значениях  $\Omega$ .

Характеристическое уравнение системы равно

$$G_{\text{ст}}(p) = \frac{K\beta_0(1-\beta_0)G_{\text{Ф}}}{\frac{3}{2} \left( \frac{K''}{K_0} U_m^2 \right)} \cdot \frac{1}{(1 + p\tau_{\text{к}})(1 + p\tau_{\text{л}})(1 + p\tau_{\text{ф}})} + 1. \quad (4)$$

Заметим, что статистический коэффициент влияния узла 3, рассчитанный по (1 и 3), имеет одно и то же значение как при учете нелинейности усилителя, так и без ее учета.

\* В случае четной нелинейности надо искать уточненное решение [4].

Например, в первом случае

$$G_{K(\text{св})}^{U'_{\text{ВЫХ}}} = \frac{G_{\text{ст}}^{U'_{\text{ВЫХ}}}}{K} = \frac{\frac{3}{2} \left( \frac{K''}{K_0} U_m^2 \right)}{K \beta_0 (1 - \beta_0) G_{\Phi}} = \frac{1}{K \beta_0 (1 - \beta_0) G_{\Phi}};$$

во втором

$$G_{K(\text{св})}^{U'_{\text{ВЫХ}}} = \frac{G_{\text{ст}}^{U'_{\text{ВЫХ}}}}{K} = \frac{1}{K \beta_0 (1 - \beta_0) G_{\Phi}}.$$

По-видимому, это обстоятельство и было основной причиной неучета искажений усилителя на устойчивость системы.

Непосредственно из (4) следует, что нелинейность усилителя имеет решающее влияние на устойчивость. Налицо противоречие — чем ниже искажения генератора, тем ниже и его критическое значение петлевого усилителя, т. е. тем меньше стабильность выходного напряжения.

Полученные результаты можно распространить и на генераторы, в которых воздействие оказывается на цепь ПОС [5, 6, 7], а цепь ООС имеется или отсутствует.

Для усилителя с отрицательной обратной связью

$$\frac{dK_{\text{св}}}{K_{\text{св}}} = \frac{dK/K}{1 + K\beta_0} \text{ и } \left( \frac{K''}{K_0} U_m^2 \right)_{\text{связи}} \approx \left( \frac{K''}{K_0} U_m^2 \right) \cdot \frac{1}{1 + K\beta_0}$$

выражение (3) принимает вид

$$G_{U_{\text{ВХ}}}^{U_{\text{ВЫХ}}}(\Omega) \approx \frac{-G_{\Phi} \cdot G_{R_{\Phi}}^{\beta}}{\frac{3}{2} \left( \frac{K''}{K_0} U_m^2 \right)_{\text{связи}}} \cdot \frac{1}{(1 + j\Omega\tau_K)(1 + j\Omega\tau_L)(1 + j\Omega\tau_{\Phi})}, \quad (5)$$

где  $\left( \frac{K''}{K_0} U_m^2 \right)_{\text{связи}} = \frac{\left( \frac{K''}{K_0} U_m^2 \right)}{1 + K\beta_0}$  — нелинейность усилителя с учетом ООС (если она имеется).

Покажем, что при малых  $\kappa_f$  система вообще неработоспособна. Примем  $K = 300$ ;  $\beta = \frac{1}{3}$ ;  $\kappa_{3г} = 5\%$  (для усилителя, не охваченного ООС. Для этого же усилителя, охваченного ООС, имеем

$$\kappa_{3г.св} \approx \frac{\kappa_{3г}}{1 + K\beta} \sim 0,05\%$$

и коэффициент третьей гармоники всего генератора (УИЭ считаем идеальным)

$$\kappa_{3г.ген} \approx \frac{\kappa_{3г.св}}{\left| 1 - \frac{\beta_n(3\omega)}{\beta_n(\omega)} \right|} \sim 0,08\%.$$

Исходя из связи между  $K(u)$  и  $\kappa_{3г}$  (для принятой аппроксимации имеем

$$\frac{3}{2} \frac{K''}{K_0} U_m^2 = 0,0015.$$

Если принять статический коэффициент влияния усилителя 3 равным 1, то и тогда для устойчивости генерации должно выполняться условие

$$\frac{100}{0,15} < \frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_3} + \frac{\tau_2 + \tau_3}{\tau_1} + \frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_3},$$

где  $\tau_1, \tau_2, \tau_3$  — постоянные времени системы ( $\tau_k, \tau_l, \tau_\phi$ ) в порядке их уменьшения.

Сняв требования малости  $K_{f\text{ген}}$ , можно получить высокую стабильность  $U_{\text{вых}}$  без всяких ухищрений. Например, при  $K_{f\text{ген}} \approx 5\%$  и тех же соотношениях  $\tau$

$$G_{K(\text{св})}^{U'_{\text{вых}}} = \frac{1}{62}!$$

Интересен тот факт, что для усилителя мощности 4 коэффициент влияния равен

$$G_{U'_{\text{вых}} \text{ связи}}^{U'_{\text{вых}}} = \frac{G_{U'_{\text{вых}}}^U}{1 + \frac{K\beta_0(1-\beta_0)G_\phi}{\frac{3}{2}\left(\frac{K''}{K_0}U_m^2\right)}},$$

Автогенератор для него по существу является обостряющим узлом.

Анализ выражения (4) показывает, что для увеличения устойчивости следует в автогенератор вводить нелинейные элементы. Применение безынерционных НЭ приводит к возрастанию нелинейных искажений, что нежелательно. Следовательно, необходимо вводить инерционный нелинейный элемент (ИНЭ).

Убедимся в эффективности предлагаемой меры. Включим ИНЭ (маломощную лампочку накаливания) в усилитель 3.

В этом случае

$$G_{K(\text{св})}^{U'_{\text{вых}}}(p) = \frac{-1}{\left[ G_{\text{кл}} \frac{1}{p\tau_n + 1} + \frac{3}{2} \left( \frac{K''}{K_0} U_m^2 \right) \right]} \cdot \frac{1}{p\tau_k + 1}$$

и

$$G_{\text{ст}}(p) \approx \frac{K\beta_0(1-\beta_0)G_\phi}{\left[ G_{\text{кл}} \frac{1}{p\tau_n + 1} + \frac{3}{2} \frac{K''}{K_0} U_m^2 \right]} \cdot \frac{1}{p\tau_k + 1} \cdot \frac{1}{p\tau_l + 1} \cdot \frac{1}{p\tau_\phi + 1} + 1, \quad (6)$$

где  $G_{\text{кл}} = G_{U_{\text{в}}}^{R_{\text{нэ}}} \cdot G_{R_{\text{нэ}}}^K$ .

Сопоставление (4) и (6) показывает, что при большой энерционности ИНЭ устойчивость системы не повышается, если же ИНЭ малоинерционен, устойчивость существенно увеличивается. Эта возможность была нами использована для построения высокочастотных амплитудно-стабильных автогенераторов с УИЭ [6].

Таким образом, в принципиальном плане, возможно создание качественных и сравнительно простых высокостабильных автогенераторов.

В практическом же плане реализация зачастую затруднена двумя препятствиями:

1. Пока мы не располагаем инерционными нелинейными элементами с малой постоянной времени и характеристиками, позволяющими легко сопрягать ИНЭ со схемой\*.

2. Необходимо применять специальные меры по защите ИНЭ от перегрузки, что в большинстве случаев приводит к усложнению схемы.

Следует также учесть, что из-за малости  $\tau_n$  увеличиваются искажения автогенератора на низких частотах.

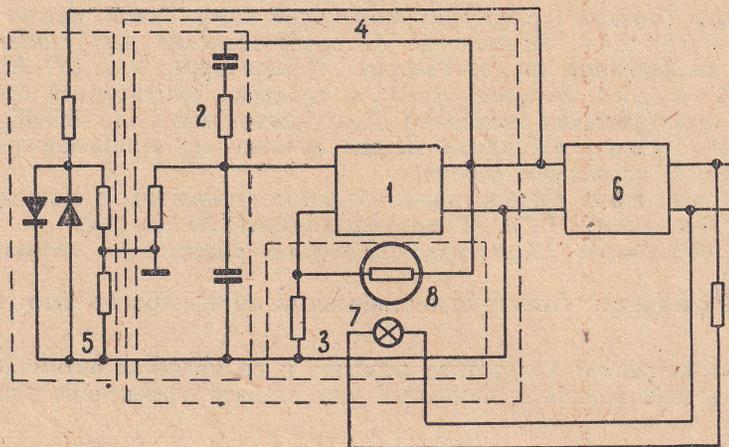


Рис. 2.

Из проведенного анализа следует вывод, что для реализации больших достоинств амплитудно-стабильных автогенераторов с УИС необходим поиск новых решений.

Одним из таких решений является генератор, функциональная схема которого дана на рис. 2.

Усилитель 1 с коэффициентом передачи  $K$  охвачен частотозависимой положительной 2 и отрицательной 3 обратными связями, образуя избирательный усилитель 4. Избирательный усилитель 4 охвачен положительной частотонезависимой обратной связью, содержащей безынерционные нелинейные элементы (полупроводниковые диоды). Стабилизация напряжения на выходе усилителя мощности 6 осуществляется тем, что лампочка 7, включенная на выходе, освещает фоторезистор 8 в цепи ООС усилителя 4, образуя контур автостабилизации. Смысл описанного решения заключается в следующем.

1. Так как создать амплитудно-стабильный генератор с очень малыми нелинейными искажениями на базе широкополосного усилителя и инерционных ИЭ мы не можем (по причине потери устойчивости), то введением безынерционных нелинейных элементов увеличиваем искажения в  $\beta_n$ -цепи и тем самым допустимый коэффициент стабилизации.

2. С целью обеспечения малых искажений на выходе генератора усилитель делаем избирательным.

3. Для стабилизации  $U_{\text{вых}}$  применяем авторегулировку коэффициента передачи избирательного усилителя.

Легко заметить, что по существу мы задачу получения стабильного синусоидального напряжения расчленили на две задачи: стабилизации

\* Самые маломощные из серийно выпускаемых лампочек накаливания — НСМ 6,3 в  $\times$  20 ма.

$U_{\text{вых}}$  и минимизации  $K_f$ . Но старались мы это сделать в пределах одной системы, совмещая функции, выполняемые некоторыми узлами\*.

Расчленение функций существенно облегчает решение поставленной задачи, но неизбежно приводит в конечном итоге к значительному усложнению системы, что далеко не всегда оправдано.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. М. С. Ройтман. Некоторые вопросы повышения точности тензометрической установки. Докл. Томской гор. научно-технической конф. Томск, изд-во ТГУ, 1959.
2. М. С. Ройтман. Применение фотосопротивлений для стабилизации напряжения. Тр II конференции по автометрии. Новосибирск, изд. СО АН СССР, 1962.
3. А. А. Львович. Вопросы теории и практики амплитудной стабилизации высокочастотных электрических колебаний. Докт. диссертация, Л., ЛЭИС. 1967.
4. М. С. Ройтман. Об одном методе нахождения стационарного решения для автогенераторов. В настоящем сборнике.
5. М. С. Ройтман. Амплитудно-стабильные генераторы с малыми нелинейными искажениями. Изв. вузов СССР. «Радиоэлектроника», № 12, 1969.
6. М. С. Ройтман. Амплитудно-стабильные электронные генераторы. Автометрия, № 1, 1969.
7. М. С. Ройтман. Амплитудно-стабильный автогенератор. Авт. свид. № 270831

---

\* Хотя рассмотренное конкретное решение и не является оптимальным, но стратегия оказалась действенной и позволила нам создать эффективно работающие автогенераторы.