

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

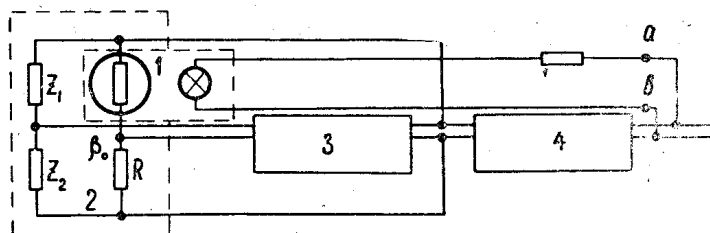


Рис. 1.

- 1 — управляемый инерционный элемент, линейный для мгновенных значений напряжения;
- 2 — цепи положительной (β_+) и отрицательной (β_0) обратной связи;
- 3 — усилитель задающего генератора;
- 4 — усилитель мощности.

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

$$G_{\lambda \text{связи}}^{U_{\text{ВЫХ}}} = \frac{G_{\lambda \text{ВЫХ}}^{U_{\text{ВЫХ}}}}{1 - G_{U_{\text{ВХ}}}^{U_{\text{ВЫХ}}}} = \frac{\prod_{i=m}^n G_i}{1 - \prod_{i=1}^n G_i} = \frac{G_{\lambda \text{ВЫХ}}^{U_{\text{ВЫХ}}}}{G_{\text{СТ}}}, \quad (1)$$

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

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

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,

Ω — частота модуляции.

Относительный коэффициент передачи разомкнутой системы (являющийся функцией частоты Ω) равен*

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

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

де G_{Φ} — статический коэффициент передачи пары лампочка — фотосопротивление;

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

τ_{Φ} — постоянная фотосопротивления;

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

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

Величину $G_{\kappa}^{U'}$ 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 β -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

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

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

и

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

где τ_{κ} — эквивалентная постоянная времени автогенератора.

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

$$G_{U' \text{ Вых}}^U(\Omega) \approx -\frac{K\beta_0(1-\beta_0)G_{\phi}}{\frac{3}{2} \left(\frac{K''}{K_0} U_m^2 \right)} \cdot \frac{1}{(1 + j\Omega\tau_{\kappa})(1 + j\Omega\tau_{\lambda})(1 + j\Omega\tau_{\phi})}. \quad (3)$$

На выходе получим напряжение с огибающей

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

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

то замкнутая система неустойчива.

Замкнутая система будет устойчива, если

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

при любых значениях Ω .

Характеристическое уравнение системы равно

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

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

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

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 κ_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

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

где τ_1, τ_2, τ_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 τ

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

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

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

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 τ_n увеличиваются искажения автогенератора на низких частотах.

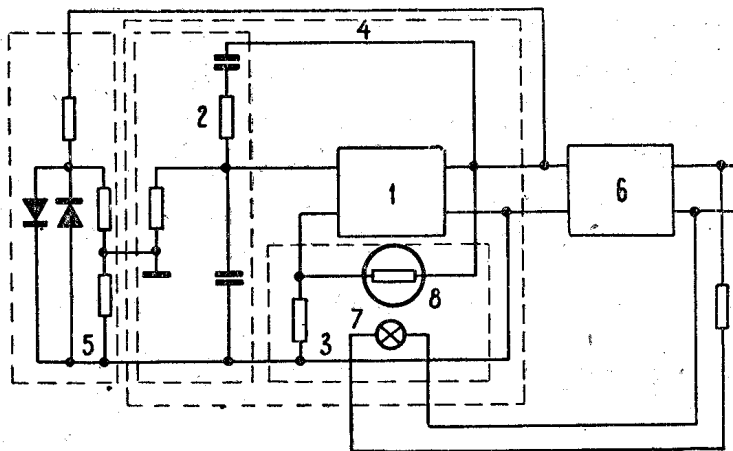


Рис. 2.

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 НЭ мы не можем (по причине потери устойчивости), то введением безынерционных нелинейных элементов увеличиваем искажения в β_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.