

К ТЕОРИИ УСТОЙЧИВОСТИ ЛБВ

В. Г. Шульга

Наличие положительной обратной связи в усилителях приводит к существенным изменениям его характеристик. В частности, в ЛБВ положительная обратная связь не желательна, так как она вызывает неустойчивость.

Анализ устойчивости можно произвести с помощью дифференциальных уравнений, преобразования Лапласа, критерия Найквиста и т. д. [1,2]. В данной статье предлагается использовать для оценки устойчивости ЛБВ критерий Найквиста.

В общем случае для усилителя с обратной связью передаточная функция определяется следующим образом:

$$\bar{G}(s) = \frac{\bar{G}_1(s)}{1 - \bar{G}_1(s)\bar{G}_2(s)}, \quad (1)$$

где $\bar{G}(s)$ — передаточная функция системы с обратной связью.

$\bar{G}_1(s)$ — передаточная функция системы без обратной связи,

$\bar{G}_2(s)$ — передаточная функция системы обратной связи.

Если разомкнутый контур системы устойчив, т. е. выражение $G_1(s)G_2(s)$ не имеет полюсов в правой полуплоскости s , то замкнутая система устойчива, когда годограф $G_1(j\omega)G_2(j\omega)$ не охватывает точку с координатами $1 + j0$.

Таким образом, амплитудная и фазовая характеристики системы позволяют оценить устойчивость замкнутой системы, а также определить частоту колебаний.

Амплитудно-фазовая характеристика системы может быть снята экспериментально или вычислена, если схема и параметры четырехполюсника известны.

Определим выражение для амплитудно-фазовой характеристики ЛБВ с положительной обратной связью. При этом предполагается, что положительная обратная связь в основном определяется наличием отражений на входном и выходном трактах ЛБВ.

Блок-схема ЛБВ с обратной связью (без локального поглотителя) приведена на рис. 1, где ρ_1 и ρ_2 , соответственно коэффициенты отражений на входе и выходе замедляющей системы. Легко показать, что передаточная функция данного усилителя с положительной обратной связью

$$\bar{G}' = \frac{\bar{G}_1}{1 - \bar{G}_1\rho_1\rho_2}. \quad (2)$$

Обычно для подавления самовозбуждения ЛБВ на отраженной волне вводится поглощающая вставка (локальный поглотитель). Ввиду этого при наличии локального поглотителя передаточная функция определяется так (рис. 2):

$$\bar{G}'' = \frac{\bar{G}_1}{1 - \bar{G}_1 G_3 \rho_1 \rho_2}, \quad (3)$$

где G_3 определяет затухание сигнала, обусловленное локальным поглотителем. Таким образом, из (2) и (3) следует, что передаточная функция разомкнутой системы без локального поглотителя

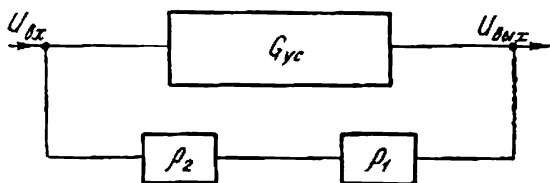


Рис. 1.

$$\bar{G}'_{\text{раз}} = \bar{G}_1 \rho_1 \rho_2, \quad (4)$$

а с локальным поглотителем

$$\bar{G}''_{\text{раз}} = \bar{G}_1 G_3 \rho_1 \rho_2. \quad (5)$$

Для построения годографа данной системы необходимо также вычислить сдвиг фазы между входным сигналом и сигналом обратной связи [3,4,5].

Если по всей длине L замедляющей системы параметры C , QC , β_e , β_0 не изменяются, то разность фаз нарастающей волны на входе и выходе ЛБВ определяется выражением

$$\Delta\varphi_1 = \beta_e L (1 - Cy_1), \quad (6)$$

где β_e — фазовая постоянная распространения волны в системе с пучком;
 C — параметр усиления;

y_1 — безразмерная постоянная, характеризующая отличие фазовой скорости волны в системе с пучком от скорости электрона.

При распространении ко входу отраженная волна получает набег фаз за счет длины замедляющей системы

$$\Delta\varphi_2 = -\beta_0 L. \quad (7)$$

Следовательно, полный набег фаз состоит из суммы

$$\varphi = \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 = \beta_e (1 - Cy_1) - \beta_0 L. \quad (8)$$

Выразив фазовую постоянную β_0 «холодной» системы, через фазовую постоянную β_e «горячей» системы

$$\beta_0 = \beta_e (1 + Cb),$$

где b — параметр скорости и, подставив в (8), получим окончательное выражение для вычисления сдвига фаз между входным сигналом и сигналом обратной связи

$$\varphi_0 = -\beta_e CL (y_1 + b). \quad (9)$$

Выражение (9) для разности фаз получено без учета фазовых искажений, которые могут быть вызваны дисперсией, наличием отражений на входе и выходе лампы, нелинейными явлениями и т. д. Вследствие того, что анализ устойчивости производится для слабодисперсных замедляющих систем, фазовые искажения за счет дисперсии незначительны и ими можно пренебречь. Дополнительные фазовые искажения благодаря наличию отражений пропорциональны [3]:

$$\frac{(КСВ + 1)^2}{4 КСВ}.$$

Например, при $КСВ=1,5$ дополнительные фазовые искажения составляют $0,4^\circ$, а при $КСВ=3$ — порядка 3° . Так как КСВ в реальных приборах не превышает 1,5, то фазовыми искажениями за счет рассогласования можно пренебречь.

Полученные выражения для передаточных функций систем с локальным поглотителем и без него (4), (5) и разности фаз (9) используются при построении годографов и последующей оценке устойчивости ЛБВ.

Величина коэффициента усиления G_1 вычисляется по известным параметрам ЛБВ. Не изменяя общности выводов, при определении передаточной функции предполагаем, что величины коэффициентов отражения ρ_1 и ρ_2 одинаковы. Величина затухания, обеспечиваемого локальным поглотителем, выбирается, исходя из значений, используемых в реальных приборах.

На основании полученных формул и указанных выше предположений было построено семейство годографов для нескольких вариантов ЛБВ. Переменными параметрами выбраны коэффициенты отражения и ускоряющее напряжение. Годографы одного из вариантов усилителя приведены на рис. 3. Как видно из графиков, годограф разомкнутой системы охватывает точку с координатами 1; 0 для всех значений коэффициентов отражения вплоть до $\rho_1 = \rho_2 = 0,1$ независимо от напряжений. Это свидетельствует о том, что замкнутая система будет неустойчивой при $\rho^2 > 0,01$. Для $\rho^2 < 0,01$ анализ не производится, так как практически согласовать замедляющую систему в широкой полосе частот с меньшими значениями ρ^2 не представляется возможным. Следовательно, при отсутствии подавления отраженной волны достигнуть устойчивой работы ЛБВ только уменьшением отражений практически невозможно.

Локальные поглотители, обладающие значительными высокочастотными потерями, ослабляют взаимодействие отраженной волны с электронным потоком. Это позволяет увеличить предельно допустимые значения коэффициентов отражения и обеспечить устойчивую работу ЛБВ. Так как локальный поглотитель вводится на некотором участке замед-

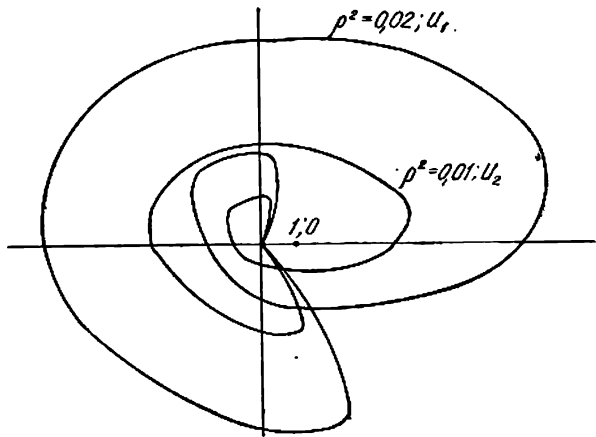


Рис. 3.

ляющей системы, то при вычислении амплитудно-фазовых характеристик ЛБВ необходимо учитывать неравномерность параметров вдоль лампы. Это значительно усложнит расчеты, но мало повлияет на конечные результаты. Ввиду сказанного для простоты предполагаем, что поглотитель равномерно распределен вдоль замедляющей системы.

На рис. 4 приведено семейство годографов разомкнутой системы для тех же значений коэффициентов отражения, что и раньше, но при наличии распределенного высокочастотного поглотителя. Из приведенных графиков видно, что при некоторых значениях коэффициентов отражения

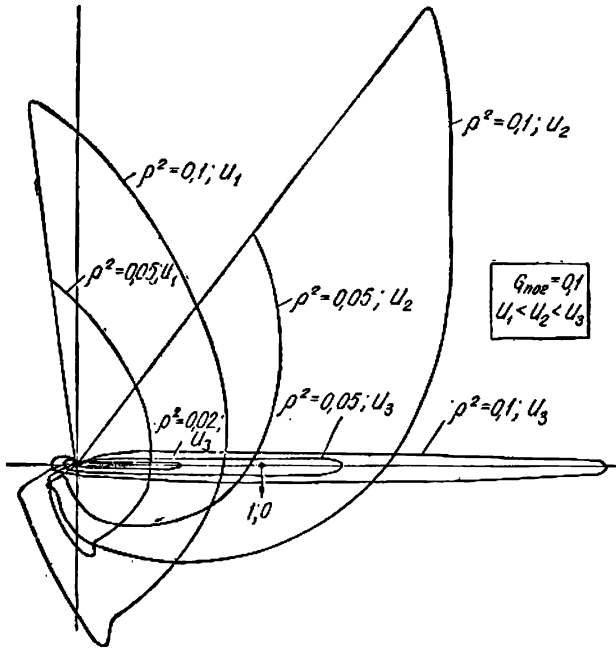


Рис. 4.

обеспечивается устойчивость ЛБВ. При $\rho^2 \leq 0,05$ и напряжении V_2 , которое соответствует рабочему, годограф разомкнутой системы не охватывает точку $1; 0$. Реально согласовать замедляющую систему в широкой полосе частот с такими значениями коэффициентов отражения не представляет значительных трудностей. Следовательно, при наличии поглощающей вставки повышаются предельно допустимые значения коэффициентов отражения до практически осуществимых.

Обратим внимание на то, что при изменении напряжения устойчивость обеспечивается при других значениях ρ^2 . Дело в том, что при увеличении напряжения возрастает усиление вблизи нижней частоты отсечки замедляющей системы. Это приводит к более жестким требованиям для предельно допустимых коэффициентов отражения, т. е. вблизи нижней частоты отсечки замедляющая система должна быть согласована с меньшими коэффициентами отражения ($\rho^2 \leq 0,025$), а в остальной части полосы пропускания устойчивость обеспечивается при прежних значениях ρ_1, ρ_2 .

С помощью данного анализа можно найти частоту возбуждения ЛБВ. Пересечение годографа амплитудно-фазовой характеристики с осью абсцисс

определяет условие, при котором возможно возбуждение системы (второе условие возникновения колебаний — баланс фаз).

Экспериментальное исследование влияния величин коэффициентов отражения и распределение их в полосе пропускания на устойчивость проводилось на нескольких ЛБВ. Замедляющая система была согласована с волноводным трактом со стороны входа и выхода с КСВ не хуже 1,1 ÷ 1,2 вблизи нижней частоты отсечки и с КСВ 1,3 ÷ 1,4 в остальной части полосы пропускания. Величина поглощения, обеспечиваемая локальным поглотителем, выбиралась равной расчетной. В результате эксперимента установлено, что при таком согласовании и величине поглощения обеспечивается устойчивая работа ЛБВ в широком интервале ускоряющих напряжений ($\pm 15\%$ от рабочего напряжения). Возбуждение возникало вне рабочего интервала напряжений и полосы пропускания. Частота возбуждения отличалась от расчетной на 2—3%, а коэффициенты отражения — на 10—15%.

Таким образом, с помощью данного анализа можно определить величины предельно допустимых значений коэффициентов отражения, величину затухания, обеспечиваемого локальным поглотителем, частоту возможного возбуждения системы с достаточной для практики точностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Харкевич. Нелинейные и параметрические явления в радиотехнике, М., ИТТЛ, 1956.
2. В. Н. Ризкин. Основы теории усилителей, М., ИИТЛ, 1958.
3. W. R. Veam, D. J. Blatther. Phase angle distortion in traveling-wave tube, RCA Review, 1956, 17, p. p. 86—96.
4. L. Guck. Rhasenverzerrung bei der Verstarkung mit Lanffeldrohren, Arch. elekt. Ubertragung, 1953, 7., 5, s. 28—36.
5. В. Клеен и К. Пёшль. Введение в электронику сверхвысоких частот, ч. 1', М., изд-во «Сов. радио», 1963.