ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА ИМЕНИ С. М. КИРОВА

Том 230 1972

К РАСЧЕТУ КЛЮЧЕВОГО СТАБИЛИЗАТОРА ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

О. С. ВАДУТОВ

(Представлена научным семинаром
кафедры автоматики и телемеханики)

Двухпозиционный стабилизатор постоянного напряжения (рис. 1), состоящий из работающего в ключевом режиме транзистора T, LC-фильтра, нагрузки R, диода Д, схемы сравнения СС и порогового модулятора *ПМ* (триггер Шмитта), относится к релейным системам автоматического регулирования и работает в режиме устойчивых автоколебаний.

При расчете стабилизатора данного типа возникают следующие задачи:

1) определение частоты и амплитуды автоколебаний при известных параметрах стабилизатора;

2) выбор какого-либо параметра стабилизатора по заданным значениям частоты и амплитуды автоколебаний.

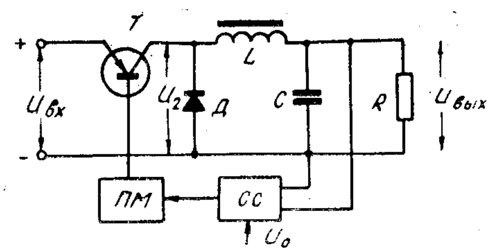

Рис. 1

Для решения этих задач используется метод гармонической линеаризации [1] и частотный метод Я. З. Цыпкина [2]. Однако предлагаемая в работах [1, 2] методика при решении второй задачи требует многократных графических построений.

В настоящей работе конечный результат исследования двухпозиционного стабилизатора методом гармонической линеаризации доводится до номограммы, которая позволяет решить обе задачи при любых практически возможных параметрах стабилизатора. Для простоты исследования, как и в работах [1, 2], принято допущение, что ключ (транзистор T), индуктивность L, диод *Д* и конденсатор C являются идеальными элементами.

Структурная схема стабилизатора показана на рис. 2,*а*. Передаточная функция линейной части системы имеет вид

$$W_л(s) = \frac{2}{LCs^2 + 2\varepsilon\sqrt{LC}\,s + 1}, \qquad (1)$$

где $\varepsilon = \frac{1}{2R}\sqrt{\frac{L}{C}}$, а характеристика релейного элемента приведена на рис. 2,*б*.

Рассматриваемый тип стабилизатора постоянного напряжения работает в режиме устойчивых несимметричных автоколебаний. Согласно методу гармонической линеаризации входной сигнал релейного элемента в установившемся режиме можно записать в виде

$$U_1 = U_0 - U_{\text{вых}} = \Delta U_{\text{вых}} + U_{\text{вых}_m} \sin \omega t, \tag{2}$$

где $\Delta U_{\text{вых}}$ — постоянная составляющая, которая может быть названа статической ошибкой стабилизатора; $U_{\text{вых}_m}$ — амплитуда автоколебаний. Выходной величиной релейного элемента в установившемся режиме является последовательность импульсов напряжения с высотой $U_{\text{вх}}$, частотой ω и скважностью γ.

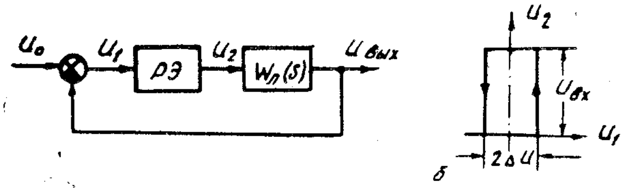

Рис. 2

Как известно из [3], эквивалентный комплексный коэффициент усиления релейного элемента с гистерезисом равен

$$W_{\text{н}}(U_{\text{вых}_m}, \gamma) = \frac{2U_{\text{вх}}}{\pi U_{\text{вых}_m}} \sin \pi\gamma \cdot \exp\left(j \arcsin \frac{\Delta U}{U_{\text{вых}_m} \sin \pi\gamma}\right), \tag{3}$$

где постоянная составляющая на входе релейного элемента $\Delta U_{\text{вых}}$ учтена через скважность выходных импульсов γ. Связь между $\Delta U_{\text{вых}}$ и γ согласно [3] определяется выражением

$$\Delta U_{\text{вых}_m} = \sqrt{U^2_{\text{вых}_m} \cos^2 \pi\gamma - \Delta U^2 \operatorname{ctg}^2 \pi\gamma}. \tag{4}$$

Условия существования автоколебаний в стабилизаторе записываются в виде двух уравнений соответственно для периодической и постоянной составляющих:

$$W_{\text{н}}(U_{\text{вых}_m}, \gamma)\, W_{\text{л}}(j\omega) + 1 = 0; \tag{5}$$

$$U_0 = U_{\text{вых}_0} + \Delta U_{\text{вых}} = \gamma U_{\text{вх}} + \sqrt{U^2_{\text{вых}_m} \cos^2 \pi\gamma - \Delta U^2 \operatorname{ctg}^2 \pi\gamma}. \tag{6}$$

Для определения установившихся значений амплитуды $U_{\text{вых}_m}$, частоты ω автоколебаний и скважности импульсов γ при известных параметрах стабилизатора и заданном значении выходного напряжения U_0 необходимо совместно решить уравнения (5) и (6), что представляет значительную трудность. Задача существенно упрощается, если γ известно. В первом приближении можно считать, что $\Delta U_{\text{вых}} \approx 0$ и тогда

$$\gamma \approx \frac{U_0}{U_{\text{вх}}}. \tag{7}$$

Мы будем считать, что $U_{\text{вых}_0}$ является заданным значением выходного напряжения и тогда

$$\gamma = \frac{U_{\text{вых}_0}}{U_{\text{вх}}}, \tag{8}$$

а величина U_0 неизвестна и ее необходимо определить.

Решив уравнение (5) при известном γ, можно определить амплитуду и частоту автоколебаний, а затем по уравнению (6) определить величину U_0. Уравнение (5) обычно решается графически на комплексной плоскости построением характеристик $W_л(j\omega)$ и $-\frac{1}{W_н}$. Однако при изменении параметров релейного элемента и линейной части эти характеристики необходимо перестраивать. Учитывая свойства выражения (3) и записав уравнение (5) в виде условий баланса амплитуд и фаз,

$$|W_л(j\omega)| = -\frac{1}{W_н(U_{вых_m}, \gamma)}; \quad (9)$$

$$\arg W_л(j\omega) = \arg\left(-\frac{1}{W_н(U_{вых_m}, \gamma)}\right), \quad (10)$$

для определения параметров автоколебаний можно предложить номограмму, показанную на рис. 3.

В первом квадранте в координатах $20\lg|W_л(j\omega)|$, $\arg W_л(j\omega)$ 1 построены частотные характеристики линейной части системы для различных значений ε. Здесь же проведены линии равных относительных частот $\Omega=\sqrt{LC}\omega$. Во втором квадранте в координатах $20\lg\left|-\frac{1}{W_н}\right|$, $\frac{U_{вых_m}}{U_{вых}}$ построена для различных γ зависимость

$$20\lg\left|-\frac{1}{W_н}\right| = 20\lg\frac{\pi\gamma}{2\sin\pi\gamma}\cdot\frac{U_{вых_m}}{U_{вых}}. \quad (11)$$

В четвертом квадранте для различных γ построена зависимость $\arg\left|-\frac{1}{W_н}\right|$ от величины $\frac{U_{вых_m}}{U_{вых}}$, которая определяется выражением

$$\arg\left|-\frac{1}{W_н}\right| = \pi - \arcsin\frac{\Delta U}{U_{вых_m}\sin\pi\gamma}. \quad (12)$$

И в третьем квадранте проведены линии равных значений относительной ширины петли гистерезиса релейного элемента $\frac{\Delta U}{U_{вых}}$, которые позволяют при известной величине $\frac{\Delta U}{U_{вых}}$ перейти от оси $\frac{U_{вых_m}}{U_{вых}}$ к оси $\frac{U_{вых_m}}{\Delta U}$.

Амплитуда и относительная частота автоколебаний при известных значениях ε, γ и $\frac{\Delta U}{U_{вых}}$ определяются очень просто путем подбора. На рис. 3 показан пример определения параметров автоколебаний при следующих значениях параметров: $\varepsilon=0{,}15$; $\gamma=0{,}6$; $\frac{\Delta U}{U_{вых}}=0{,}0003$. При этом получен результат: относительная амплитуда автоколебаний $\frac{U_{вых_m}}{U_{вых}}=0{,}0103$ и относительная частота $\Omega=10$. Отметим, что номограмма дает приближенные результаты в силу приближенности метода гармонической линеаризации, заложенного в основу номограммы.

Анализ полученной номограммы позволяет сделать некоторые выводы, полезные при проектировании данного типа стабилизатора:

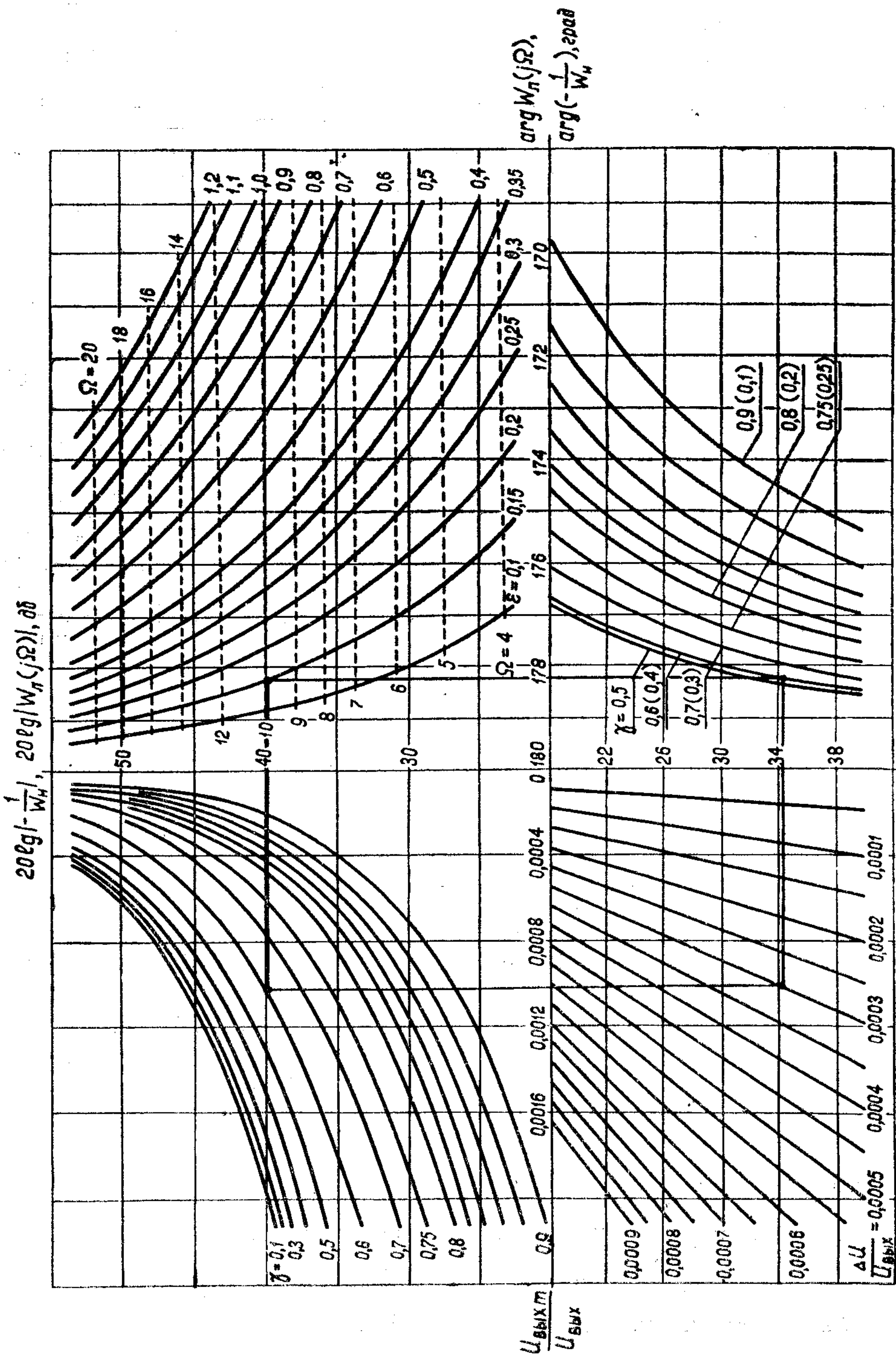
$20\lg\left|-\frac{1}{W_н}\right|$, $20\lg|W_п(j\Omega)|$, дб
$\arg W_п(j\Omega)$, $\arg\left(-\frac{1}{W_н}\right)$, град
$\frac{U_{вых\,m}}{U_{вых}}$
$\frac{U_{вых\,m}}{\Delta U}$
$\frac{\Delta U}{U_{вых}}$
$\Omega = 20$
$\Omega = 4$
$\xi = 0{,}1$
$\delta = 0{,}1$
$\chi = 0{,}5$
0,9 (0,1)
0,8 (0,2)
0,75 (0,25)
0,6 (0,4)
0,7 (0,3)

Рис. 3

а) чем больше при $\varepsilon=\mathrm{const}$ и $\gamma=\mathrm{const}$ ширина петли гистерезиса, тем больше амплитуда и относительная частота установившихся автоколебаний;

б) чем больше ε при $\gamma=\mathrm{const}$ и $\Delta U=\mathrm{const}$, тем меньше амплитуда и больше относительная частота автоколебаний;

в) чем больше ширина петли гистерезиса при $\gamma=\mathrm{const}$, тем больше должно быть ε, чтобы получить ту же самую амплитуду автоколебаний.

При проектировании стабилизатора, используя номограмму, можно определить значения ΔU, ε и Ω по заданной допустимой амплитуде и желаемой частоте автоколебаний. Величины L и C определяются из выражений

$$\varepsilon=\frac{1}{2R}\sqrt{\frac{L}{C}}; \tag{13}$$

$$\Omega=\omega\sqrt{LC}, \tag{14}$$

где ω — желаемая частота переключения ключа, определяемая из дополнительных условий, в частности по к. п. д.

Из выражений (13) и (14) получим

$$L=\frac{2R\varepsilon\Omega}{\omega}; \tag{15}$$

$$C=\frac{\Omega}{2R\varepsilon\omega}. \tag{16}$$

В заключение отметим, что номограмма позволяет быстро проанализировать влияние изменения напряжения питания $U_{\text{вх}}$ и нагрузки R на параметры автоколебаний и выбрать параметры стабилизатора так, чтобы амплитуда и частота автоколебаний находились в допустимых пределах при любых изменениях $U_{\text{вх}}$ и R.

Выводы

1) Предложена номограмма, позволяющая выбрать параметры двухпозиционного стабилизатора по заданным амплитуде и частоте автоколебаний.

2) При соответствующей перестройке частотных характеристик линейной части номограмма может быть использована при расчете и других релейных систем с подобной характеристикой релейного элемента.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Е. Китаев, Г. С. Плотников, В. С. Шевелев, А. А. Бокуняев. Двухпозиционный стабилизатор постоянного напряжения. Тр. учебных институтов связи, Л., вып. 37, 1968.

2. В. Е. Китаев, А. А. Бокуняев. Ключевой стабилизатор постоянного напряжения. Электросвязь, № 7, 1968.

3. О. Дж. М. Смит. Автоматическое регулирование. Физматгиз, М., 1962.