

СХЕМЫ ТИПИЧНЫХ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В. И. Калашиников, А. Я. Шпильберг

Харьков

При моделировании систем автоматического регулирования и управления типичные нелинейные характеристики их элементов (например, зона нечувствительности, ограничение по амплитуде, люфт и др.) воспроизводятся с помощью широко известных диодных схем [1, 2, 3]. Несмотря на схемную простоту, последние обладают рядом существенных недостатков, которые понижают общую точность моделирования, затрудняют набор задачи, а в некоторых случаях полностью исключают возможность применения этих схем. Одним из таких недостатков является большое выходное сопротивление (до 10 ком), зависящее от величины устанавливаемого порога ограничения. Пренебрежение влиянием выходного сопротивления при подготовке задачи приводит к значительным погрешностям, а учет его требует экспериментального уточнения. Например, в схеме рис. 1, а коэффициент передачи по напряжению равен

$$K = \frac{R_2}{r_{\text{вн}} R_1} \cdot \left[\frac{1}{\text{ам}} \right]$$

Рассматривая $r_{\text{вн}}$ как неучтенное приращение ΔR_1 , получаем

$$\frac{\Delta K}{K} = \frac{\frac{\Delta R}{R_1}}{1 + \frac{\Delta R_1}{R_1}} \approx \frac{\Delta R_1}{R_1},$$

где ΔK — абсолютное изменение коэффициента передачи.

Для больших коэффициентов усиления, что соответствует малым значениям R_1 , и ограниченном количестве решающих элементов относительное изменение коэффициента усиления может достичь значительной величины. Например,

$$R_1 = 50 \text{ ком}, \quad \Delta R_1 = r_{\text{вн}} = 5 \text{ ком}$$

$$\frac{\Delta K}{K} = \frac{\frac{5}{50}}{1 + \frac{5}{50}} = 0,091, \text{ т. е. } 9,1\%.$$

Так же обстоит дело с применением подобной нелинейности в качестве ограничителя выходного напряжения по схеме рис. 1, б, где коэффициент передачи усилителя не может быть сведен к нулю. Кроме того, вследствие большого внутреннего сопротивления ограничивается диапазон рабочих частот в случае подключения к нелинейности емкостной нагрузки, например, при моделировании люфта. Б. Я. Коган [1] рекомендует для снижения динамической погрешности (расширения частотного диапазона) уменьшать величину емкости, нагружающей нелинейность. Такой метод

недопустим при большой длительности решения задач (до 10 мин), так как уменьшение емкости на входе усилителя пропорционально понижает коэффициент передачи, что приводит к увеличению относительной погрешности. В свою очередь, уменьшение емкости в цепи обратной связи с целью сохранения прежней величины коэффициента передачи значительно увеличивает дрейф выходного уровня усилителей.

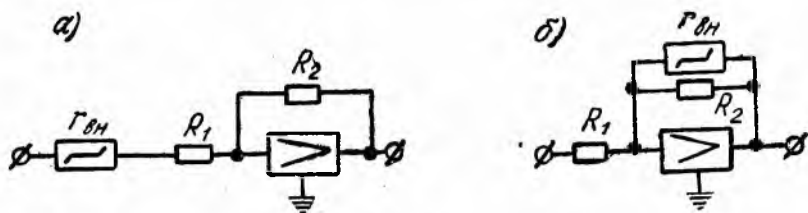


Рис. 1.

Вторым недостатком применяемой схемы нелинейности типа «зона нечувствительности» является изменение коэффициента передачи при изменении порогов ограничения. Как следует из схемы (рис. 2), коэффициент передачи меняется в зависимости от устанавливаемого порога ограничения в пределах

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} \leq K \leq 1.$$

Ввиду того, что требуется получать ограничение на уровне до 100 в, а напряжение питания U обычно не превышает 300 в, получаем

$$\frac{R_2}{R_1} \leq 2.$$

Отсюда

$$K_{\min} = 0,66,$$

что изменяет коэффициент передачи на 33% при изменении порога ограничения от 0 до 100 в.

Существенными недостатками обладает и схема, применяемая для ограничения напряжения по амплитуде. Схема не обеспечивает качественного ограничения, а при работе на емкостную нагрузку имеет чрезвычайно большое внутрен-

нее сопротивление, кроме того, схема не дает четкой отсечки.

Рассматриваемые ниже схемы позволили в значительной степени уменьшить указанные недостатки, а некоторые из них устранить полностью.

Ограничитель напряжения для моделирования зоны нечувствительности

Принципиальная схема приведена на рис. 3. В данном ограничителе можно выделить четыре функционально обособленных узла: узел алгебраического суммирования напряжения входа с напряжением порогов ограничения, выполненный на четырех сопротивлениях ($R_1 - R_4$); узел установки порогов ограничения и управления ими внешним напряжением ($L_1, L_2, R_5 - R_8$); узел буферных катодных повторителей, содержащий лампы L_3, L_4 , кремниевые стабилитроны $CT1$ и $CT2$ и сопротивления $R_9 - R_{12}$ и узел собственно ограничителя (L_5, L_6). Все устройство работает следующим об-

разом: входное напряжение от источника с малым внутренним сопротивлением поступает на сопротивления R_2 , R_3 , а напряжения порогов ограничения — на сопротивления R_1 и R_4 . В точках B и Γ получается точное алгебраическое суммирование напряжений ввиду отсутствия сеточных токов у ламп Π_3 , Π_4 . В катодные цепи ламп Π_3 и Π_4 включены кремниевые стабилизаторы, которые

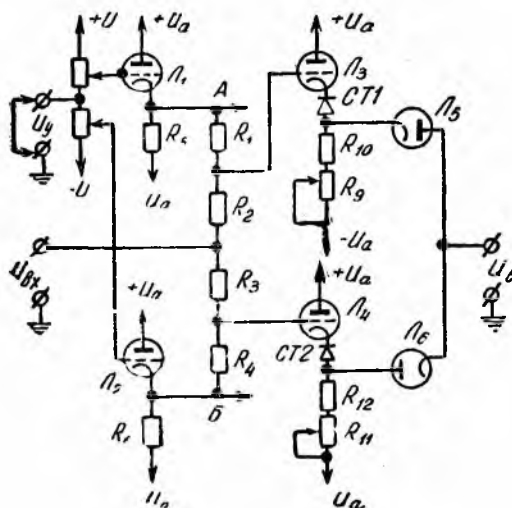


Рис. 3.

компенсируют сеточное смещение, не увеличивая практически выходных сопротивлений катодных повторителей. Подстройка сеточного смещения к напряжению стабилизации $CT1$ и $CT2$ осуществляется изменением величины сопротивления R_9 и R_{11} в цепях катодов ламп Π_3 и Π_4 . На выходе катодных повторителей (точки D , E) подключены диоды Π_5 , Π_6 таким образом, что напряжение порогов ограничения при $U_{вх} = 0$ запирает их. Подача входного напряжения той или иной полярности вызывает уменьшение запирающего напряжения соответствующего диода и в конечном счете один из диодов открывается.

С этого момента на выходе схемы появляется напряжение $U_{вых}$, отличающееся от входного напряжения $U_{вх}$ на величину, равную половине порога ограничения, и повторяющее изменения входного напряжения с коэффициентом передачи $K_n = 0,5$. Таким образом,

$$U_{вых} = 0,5 (U_{вх} - U_{огр}); U_{вх} \geq U_{огр}$$

где $U_{огр}$ — величина порога ограничения.

Установка порогов ограничения производится с помощью потенциометров R_7 и R_8 и может измеряться в точках A и B обычным магнитоэлектрическим прибором. Предусмотрено управление порогами ограничения внешним напряжением U_y , для чего в схему введен переключатель $T6$. На рис. 4 представлен график зависимости выходного напряжения $U_{вых}$ от $U_{вх}$ для различных полярностей управляющего напряжения. Испытания опытного образца описанной схемы дали следующие результаты.

1. Внутреннее сопротивление ограничителя было порядка 300 Ω вместо 5000—10000 Ω у применяемых в настоящее время ограничителей.
2. Получена возможность удобной установки порогов ограничения непосредственно на ограничителе.
3. Получена высокая точность ограничения напряжения и его передачи даже при работе на емкостную нагрузку в 1 $\mu\text{кф}$, вплоть до частот порядка 30 Гц .

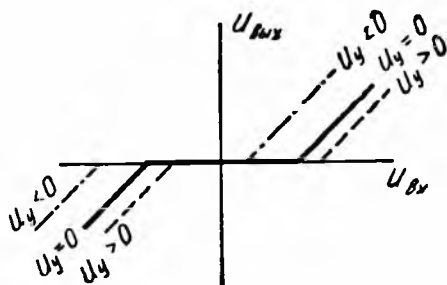


Рис. 4.

4. Получен стабильный коэффициент передачи равный 0,5 при любом пороге ограничения и во всем диапазоне изменения входного напряжения ± 100 в.

5. К дополнительным преимуществам схемы следует отнести возможность простого управления порогами ограничения с помощью внешнего напряжения.

Схема ограничения напряжения по амплитуде

Предлагаемая схема приведена на рис. 5. В данном ограничителе напряжения выделяются три функционально обособленных узла: диодный

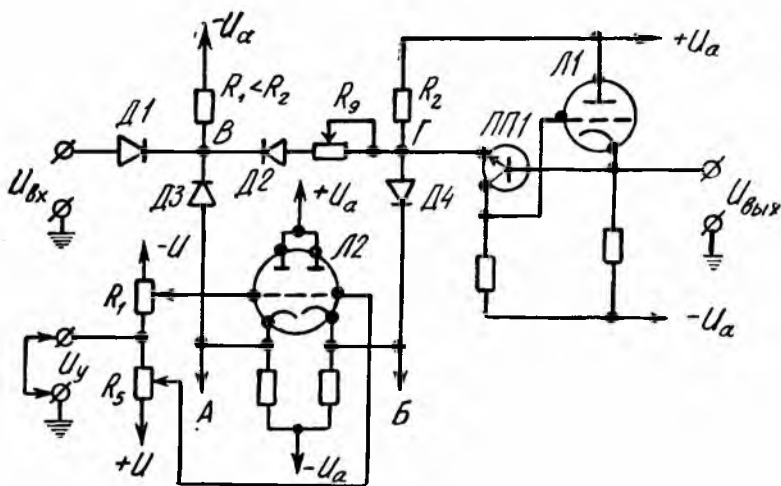


Рис. 5.

ключ, состоящий из четырех германиевых диодов ($D1 + D4$) и трех сопротивлений ($R_1 - R_3$); узел установки и смещения порогов ограничения ($Л2$) и катодный повторитель с улучшенными характеристиками ($ПП1$, и $Л1$ [14]). Ограничитель работает следующим образом. На диод $D1$ поступает входное напряжение $U_{вх}$ от источника сигнала с малым внутренним сопротивлением, которым обычно является операционный усилитель. Диоды $D1$ и $D2$ открыты, вследствие чего напряжения в точках B и $Г$ повторяют входное напряжение до величины порогов ограничения. Уровень порогов ограничения определяется напряжением на катодах лампы $Л2$. По достижении напряжением $U_{вх}$ порогов ограничения закрывается либо диод $D1$, либо $D2$ в зависимости от полярности напряжения входа. Дальнейшее изменение последнего не меняет потенциала в точке $Г$. К точке $Г$ подключен вход катодного повторителя с улучшенными характеристиками, который обеспечивает точную передачу входного напряжения на выход устройства — катод лампы $Л1$. Установка порогов ограничения производится с помощью потенциометров R_4 и R_5 и может измеряться в точках A и B обычным магнитоэлектрическим прибором. В схеме предусмотрено управление порогами ограничения внешним напряжением U_y , для чего в схему введён переключатель $T6$. На рис. 6 представлен график зависимости выходного напряжения $U_{вых}$ от $U_{вх}$ для различных полярностей управляющего напряжения.

Испытания ограничителя напряжения дали следующие результаты:

1) внутреннее сопротивление ограничителя было порядка 50 ом;

2) получена высокая точность (около 0,5%) ограничения напряжения и передачи его при работе на емкостную нагрузку порядка 1 мкф вплоть до частоты 60 гц;

3) получена дополнительная возможность простого управления порогами ограничения внешним напряжением;

4) схема позволяет устанавливать пороги ограничения непосредственно на ограничителе.

В описанных выше схемах ограничителей напряжения во много раз ослаблены существенные недостатки прежних схем, которые не позволяли исследовать и решать широкий класс задач автоматического регулирования с требуемой точностью.

Применение предложенных схем хотя и связано с некоторым усложнением конструкции нелинейных элементов, но последнее оправдывается возможностью получения характеристик типичных нелинейностей, близких к идеальным, возможностью набора задач без предварительных экспериментов и значительным повышением точности моделирования систем авторегулирования. Кроме того, применение предлагаемых схем позволяет сократить число операционных усилителей, так как схема обладает мощным выходом и большим входным сопротивлением.

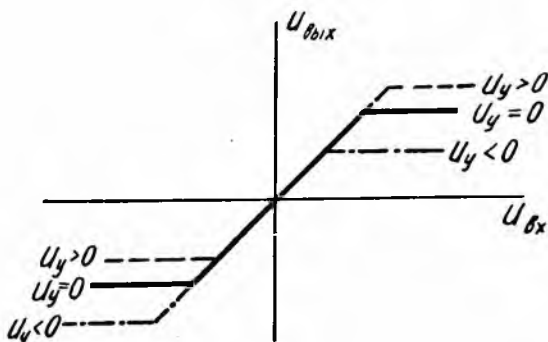


Рис. 6.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Я. Коган. Электронные моделирующие устройства и их применение для исследования систем автоматического регулирования. Физматгиз, 1959.
2. Г. Корн, Т. Корн. Электронные моделирующие устройства. Изд.-во иностр. лит., 1955.
3. C. D. Morill, and R. V. Baum. Diode limiters simulate mechanical phenomena., Electronics, v. 25, N 11, p. 122, 1952.
4. В. И. Калашников, А. Я. Шпильберг. Катодный повторитель, авт. свид. № 146 780.