

АНАЛИЗ ЧЕТЫРЕХКВАДРАНТНОГО ПРЕЦИЗИОННОГО МНОЖИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Г. С. Володченко, Г. А. Коваленко

Харьков

С развитием приспособляющихся автоматических систем и систем идентификации управляемых объектов широкое распространение получили устройства, имеющие переменный динамический коэффициент передачи. Такие системы построены на основе множительных устройств определенного класса. Существуют различные типы множительных устройств. Однако точность воспроизведения требуемой функциональной зависимости при малых значениях командного сигнала ($2 \div 5$) мВ составляет не менее 10—20%.

В статье рассматривается четырехквadrантное прецизионное множительное устройство высокой точности и чувствительности. В основу построения его положен время-импульсный принцип перемножения двух входных напряжений, согласно которому относительная длительность импульса, пропорциональная одной входной величине, умножается на его амплитуду, пропорциональную другой входной величине. Среднее значение выходного напряжения такого множительного устройства

$$U_{\text{вых. ср}} = K t_n U_{\text{вх}2},$$

где

$$t_n = K_1 U_{\text{вх}1};$$

K, K_1 — коэффициенты пропорциональности.

Тогда

$$U_{\text{вых. ср}} = K K_1 U_{\text{вх}1} U_{\text{вх}2}, \quad (1)$$

где $K \cdot K_1 = K_0$.

Функциональная схема прецизионного множительного устройства, реализующая выражение (1), включает в себя генератор треугольного тока (ГТТ) и модуляторы — широтно-импульсный (ШИМ) и амплитудно-импульсный (АИМ).

Генератор треугольного тока (рис. 1), коммутируемый напряжением прямоугольной формы, представляет собой диодный мост с последовательно включенными емкостью и эмиттерным повторителем, выполненным на полупроводниковом триоде ПТ1 типа 1Т403Б. Благодаря такой схеме включения, напряжение на емкости в каждый полупериод изменяется по линейному закону и является функцией тока, проходящего через емкость и триод ПТ1:

$$U_c = \frac{1}{C} \int_0^{T/2} i_m dt = \frac{i_m T}{2C}, \quad (2)$$

где i_m — ток, протекающий через емкость C .

Напряжение U_c , описываемое выражением (2), является коммутирующим напряжением U_k широтно-импульсного модулятора (рис. 2). Принципиальная электрическая схема ШИМ выполнена на полупроводниковых триодах типа П21Б по схеме параллельного балансного

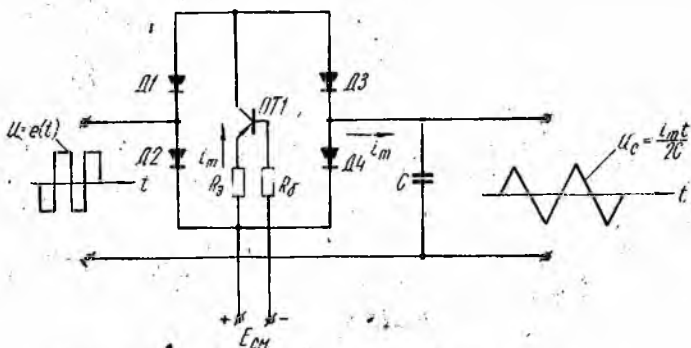


Рис. 1. Генератор треугольного тока (ГТТ).

усилителя с коммутирующим трансформатором ТР1. Рабочий режим ее выбран так, что триоды в схеме работают в режиме отсечки (режим класса Д). Таким образом, при отсутствии входного сигнала на выходе

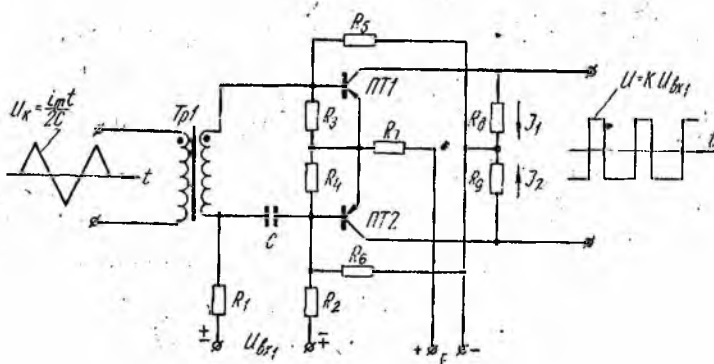


Рис. 2. Широтно-импульсный модулятор (ШИМ).

схемы ШИМ имеется переменное напряжение прямоугольной формы с относительной длительностью импульсов

$$\gamma_0 = \frac{t_n}{T} = 0,5.$$

Принцип работы схемы ШИМ поясняется эярами коммутирующего U_k , входного $U_{вх1}$ и выходного U напряжений (рис. 3).

При отсутствии командного сигнала на выходе схемы широтно-импульсного модулятора действует только коммутирующее напряжение, изменяющееся по закону

$$U_k = \frac{i_m T}{2C}.$$

При этом выходное напряжение в схеме ШИМ в каждый полупериод представляет собой переменное напряжение прямоугольной формы (рис. 3, б) с относительной длительностью импульсов

$$\gamma_0 = \frac{t_n}{T} = 0,5.$$

При появлении входного сигнала $U_{вх1}$ указанной полярности имеет место равенство

$$\frac{i_m t}{2C} = U_{вх1},$$

откуда

$$t = \frac{2C}{i_m} U_{вх1}. \quad (3)$$

Как следует из рис. 3, длительность импульсов при положительной амплитуде коммутирующего напряжения

$$t_{u1} = \frac{T}{2} + 2t,$$

а при отрицательной

$$t_{u2} = \frac{T}{2} - 2t.$$

Подставив значение t из формулы (3) в выражение длительности импульсов t_{u1} и t_{u2} , получим

$$t_{u1} = \frac{T}{2} + \frac{4C}{i_m} U_{вх1}, \quad (4)$$

$$t_{u2} = \frac{T}{2} - \frac{4C}{i_m} U_{вх1}.$$

В общем случае с появлением знакопеременного входного сигнала $\pm U_{вх1}$

$$t_{u1} = \frac{T}{2} \pm \frac{4C}{i_m} U_{вх1},$$

$$t_{u2} = \frac{T}{2} \mp \frac{4C}{i_m} U_{вх1}.$$

Отношение длительностей импульсов t_{u1} и t_{u2} к периоду T , представляет собой зависимость относительной длительности импульса от входного сигнала

$$\gamma_1 = \frac{t_{u1}}{T} = \frac{1}{2} \pm \frac{4C}{Ti_m} U_{вх1}, \quad (5)$$

$$\gamma_2 = \frac{t_{u2}}{T} = \frac{1}{2} \mp \frac{4C}{Ti_m} U_{вх1}. \quad (6)$$

Анализ выражений (5), (6) показывает, что относительная длительность импульсов в общем случае изменяется по линейному закону в функции входного сигнала $U_{вх1}$ с изменением знака в зависимости от его полярности.

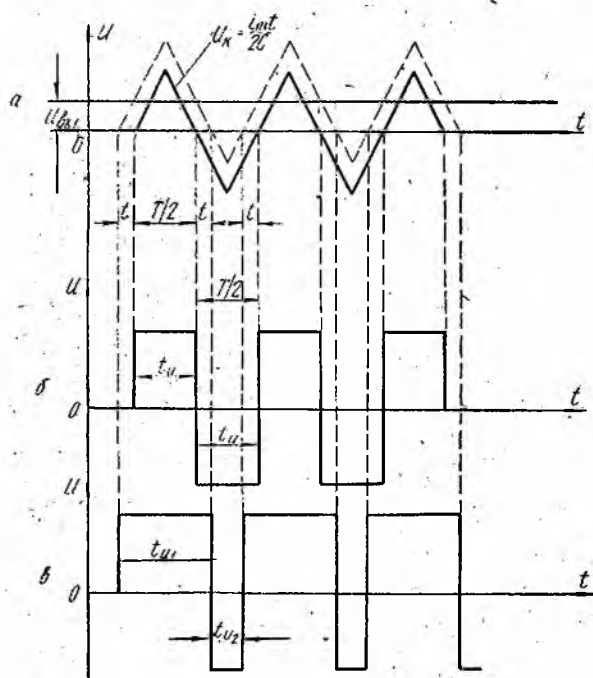


Рис. 3. Эпюры коммутирующего, входного и выходного напряжений ШИМ: а — смещение коммутирующего напряжения в зависимости от входного сигнала; б — форма выходного напряжения при отсутствии входного сигнала; в — форма выходного напряжения при появлении входного сигнала.

Таким образом, при появлении входного сигнала $U_{вх1}$ триоды $ПТ1$ и $ПТ2$ широтно-импульсного модулятора работают в режиме переключения и в каждом из нагрузочных сопротивлений R_8 и R_9 триодов $ПТ1$ и $ПТ2$ протекают токи, пропорциональные соответствующей относительной длительности импульса.

Следовательно, выходное напряжение в схеме ШИМ определится разностью

$$U_{вых. ш} = I_1 R_8 - I_2 R_9,$$

где

$$R_8 = R_9 = R; I_1 = K_2 \gamma_1; I_2 = K_2 \gamma_2.$$

Тогда

$$U_{вых. ш} = RK_2 (\gamma_1 - \gamma_2). \quad (7)$$

Подставив в выражение (7) значения γ_1 и γ_2 , после несложного преобразования получим

$$U_{вых. ш} = \frac{8K_2 RC}{T i_m} U_{вх1}, \quad (8)$$

где K_2 — коэффициент усиления широтно-импульсного модулятора. Равенство (8) представляет собой аналитическое выражение статической характеристики широтно-импульсного модулятора.

Операция умножения двух независимых входных сигналов $U_{вх1}$ и $U_{вх2}$ производится амплитудно-импульсным модулятором, выполненным на полупроводниковых триодах типа МП16 по дифференциальной схеме. Суть умножения сводится к следующему. При наличии $U_{вх1}$ и $U_{вх2}$ среднее значение выходного напряжения множительного устройства

$$U_{вых. ср} = R_1 (I_{1ср} - I_{2ср}).$$

Здесь

$$I_{1ср} = \frac{U_{вх2}}{R_1 + r_k} \gamma_1;$$

$$I_{2ср} = \frac{U_{вх2}}{R_1 + r_k} \gamma_2,$$

где r_k — сопротивление открытого интегрального ключа.

Тогда

$$U_{вых. ср} = R_1 \left(\frac{U_{вх2}}{R_1 + r_k} \gamma_1 - \frac{U_{вх2}}{R_1 + r_k} \gamma_2 \right) = \frac{R_1}{R_1 + r_k} U_{вх2} (\gamma_1 - \gamma_2).$$

Подставив значения γ_1 и γ_2 из выражений (5) и (6), после несложного преобразования получим

$$U_{вых. ср} = \frac{R_1}{R_1 + r_k} \cdot \frac{8C}{T i_m} U_{вх1} \cdot U_{вх2}. \quad (9)$$

Уравнение (9) представляет собой аналитическое выражение статической характеристики множительного устройства. Если считать, что $U_{вх1} = U_{вх2} = U_{вх}$, уравнение (9) примет вид

$$U_{вых. ср} = \frac{R_1}{R_1 + r_k} \cdot \frac{8C}{T i_m} U_{вх}^2, \quad (10)$$

где

$$\frac{R_1}{R_1 + r_k} \cdot \frac{8C}{T i_m} = K_0.$$

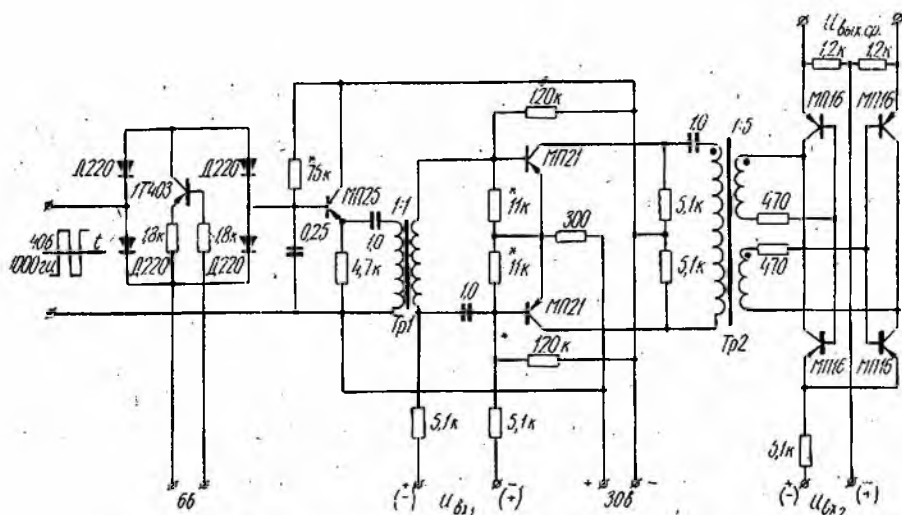


Рис. 4. Четырехквадрантное умножительное устройство.

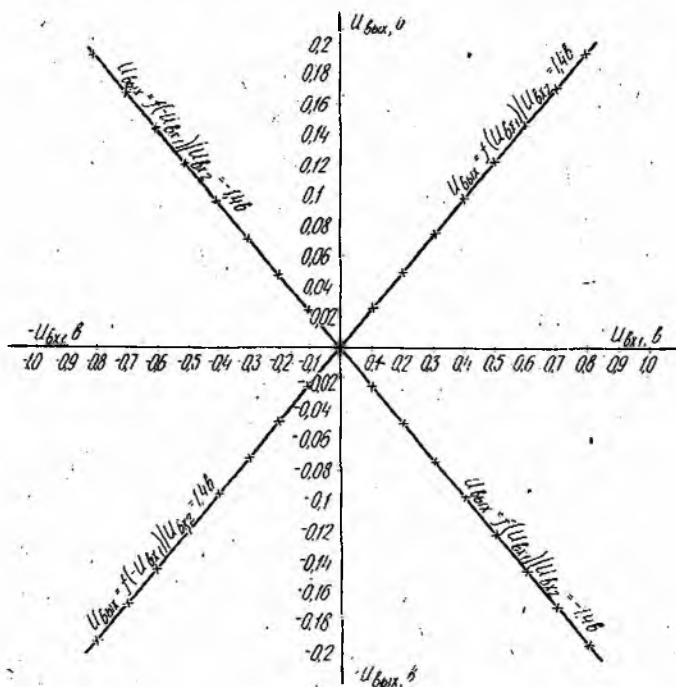


Рис. 5. Выходные характеристики четырехквадрантного умножительного устройства $U_{\text{вых}} = f(\pm U_{\text{вх1}}) / \pm U_{\text{вх2}} = \text{const}$

Выражение (10) показывает параболическую зависимость выходного напряжения множительного устройства от входного.

На рис. 4. приведена практическая принципиальная электрическая схема четырехквadrантного множительного устройства, позволяющая

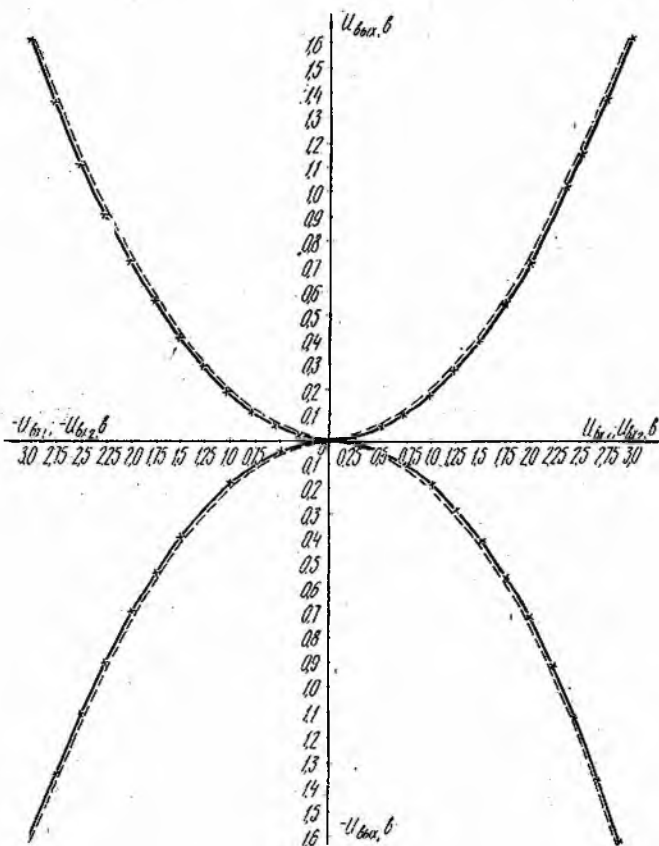


Рис. 6. Выходные характеристики четырехквadrантного множительного устройства при $U_{вх1} = U_{вх2}$.

реализовать выражение (9). Схема производит операции четырехквadrантного умножения и возведения в квадрат медленно изменяющихся входных напряжений по любому закону. Общая погрешность операции умножения и возведения в квадрат не превышает 0,5% в диапазоне входных сигналов от 2—5 мВ до 4 В.

Расчетные и экспериментальные статические характеристики даны на рис. 5, 6. Из этих характеристик следует, что устройство, выполненное по принципиальной электрической схеме рис. 4, позволяет производить операцию умножения двух независимых переменных в четырех квадрантах с погрешностью, не превышающей 0,5% в диапазоне входных сигналов $U_{вх2} = 0 \div 10$ В и $U_{вх1} = (2-5) \text{ мВ} \div 4$ В.

Анализ приведенных экспериментальных и расчетных характеристик показывает практическое их совпадение, а на основании изложенного выше можно сделать следующие выводы.

1. Рассмотренная схема множительного устройства с указанной степенью точности производит операции умножения и возведения в квадрат в четырех квадрантах.

2. Приведенная схема прецизионного множительного устройства позволяет выполнить устройство в модульном исполнении на основе передовой технологии.

3. Схема может найти широкое применение в области регулирования нелинейных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. В. Латенко. Аналоговые множительные устройства. Гостехиздат УССР, 1963.
2. А. А. Маслов. Обзор и классификация множительных устройств. «Автоматика и телемеханика», т. 21, № 10, 1960.
3. В. О. Куликов и А. Д. Пущаловский. Перемножающее устройство на магнитных усилителях. «Автоматика», 1961, № 1.
4. Г. С. Володченко. Перемножающие устройства. «Вопросы радиоэлектроники», серия общетехническая, вып. 31. Государственный комитет по радиоэлектронике при Совете Министров СССР, 1964.