

**ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНЫЙ МОДУЛЯТОР
ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ
ПОСТОЯННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И Э.Д.С.**

Ю. М. АГЕЕВ, В. П. КАЗЬМИН

(Представлена научным семинаром
кафедры автоматики и телемеханики)

В некоторых случаях из-за низкого входного сопротивления ШИМ без обратной связи [1, 2] не может быть использован для преобразования напряжений. Повышение же входного сопротивления за счет уменьшения диаметра провода обмоток управления нельзя считать удовлетворительным решением, так как в этом случае возникают трудности при изготовлении модулятора, возрастает его стоимость и увеличивается погрешность преобразования из-за значительного изменения входного сопротивления при изменении окружающей температуры. Кроме того, увеличение входного сопротивления, таким образом, сопровождается понижением чувствительности к напряжению.

Этот же недостаток ограничивает возможности применения ШИМ с отрицательной обратной связью, где чувствительность уменьшается пропорционально увеличению входного сопротивления. Но понижения чувствительности можно не допустить, применив в схеме ШИМ кроме отрицательной, еще и положительную обратную связь. Этот принцип и положен в основу схемы ШИМ, предназначенного для преобразования постоянного напряжения. Отметим, что отрицательная обратная связь в данном случае выполняется по способу, изображенному на рис. 1,а, а положительная — способом, показанным на рис. 1,б.

Структурная схема модулятора с положительной и отрицательной обратными связями приведена на рис. 1,в.

Если в качестве входного сигнала рассматривать напряжение управления $U_y(s)$, передаточной функцией ШИМ будет

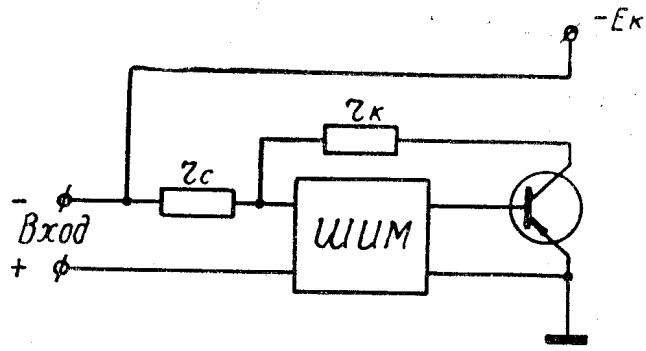
$$W(s) = \frac{\eta_2 S_n (1 + sT_{oc})}{\eta_1 (1 + sT_y) (1 + sT_{oc}) + \beta_1 \eta_2 S_n (1 + sT_{oc}) - \beta_2 \eta_1 S_n (1 + sT_y)}. \quad (1)$$

Здесь

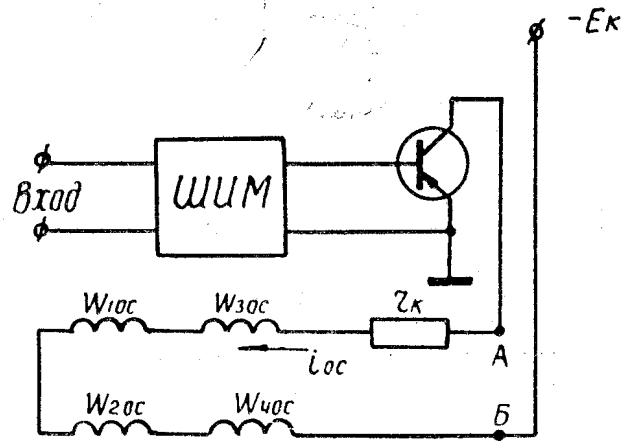
$$\eta_1 = \frac{r_{вх} + r_c}{r_{вх}}; \quad \eta_2 = \sqrt{\frac{Q_y}{Q_y + Q_{oc}}}; \quad r_{вх} = 4r_y,$$

Q_y, Q_c — площади окна сердечника, занимаемые обмотками управления и обратной связи;

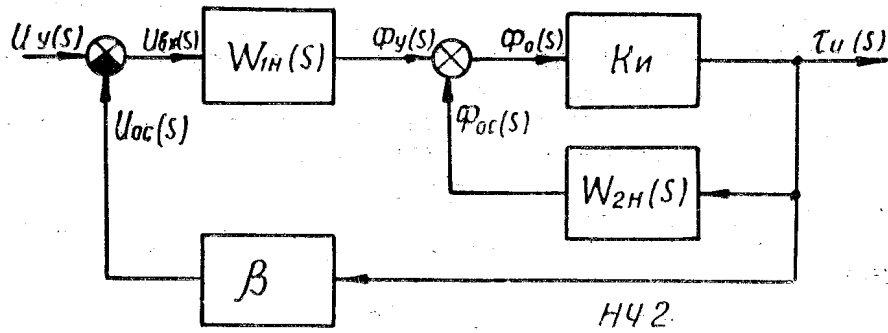
$S_n = \frac{W_y}{2j l H \min(p+g-1) r_{вх}}$ — чувствительность к напряжению управления ШИМ без О. С.;



а)



б)



в)

Рис. 1

$$T_{oc} = \frac{2M_0 M_d p Q_c}{(p+q-1)l} \left(\frac{\eta_2^2 W_y}{r_{вх}} + \frac{W_B^2}{4r_B} + \frac{W_{cm}^2}{4r_{cm} + R_2} + \frac{W_{oc}^2}{r_k + 4r_{oc}} \right);$$

$$T_y = \frac{2M_0 M_d p Q_c}{(p+q-1)l} \left(\frac{\eta_2^2 W_y^2}{r_{вх}} + \frac{W_B^2}{4r_B} + \frac{W_{cm}^2}{4r_{cm} + R_2} \right);$$

$$\beta_1 = \frac{E_k f \cdot r_c}{r_c + r_k}; \quad \beta_2 = \frac{E_k / W_{oc} r_{вх}}{W_y (r_k + 4r_{oc})}.$$

Рассмотрим статические свойства ШИМ с отрицательной и положительной О. С. При $h=0,5$ характеристика вход-выход описывается уравнением

$$\tau = \frac{\eta_2 S_n U_y}{\eta_1 + \beta_1 \eta_2 S_n - \beta_2 \eta_1 S_n}. \quad (2)$$

В зависимости от соотношения коэффициентов П. О. С. и О. О. С. можно выделить два случая.

В первом обеспечивается равенство $\beta_1 \eta_2 = \beta_2 \eta_1$ и статическая характеристика принимает вид:

$$\tau_n = \frac{\eta_2 S_n U_y}{\eta_1}. \quad (3)$$

Во втором случае $\beta_2 S_n = 1$, в результате чего получаем

$$\tau_n = \frac{U_y}{\beta_1}. \quad (4)$$

В первом случае при значениях коэффициентов $\eta_1 \eta_2$, близких к единице, все характеристики ШИМ с П. О. С. и О. О. С. примерно такие же, что и у модулятора без О. С. Исключение представляет лишь входное сопротивление $R_{вх}$, которое при наличии О. С. увеличивается в $\frac{\eta_1}{1 - \beta_2 S_n}$ раз, т. е.

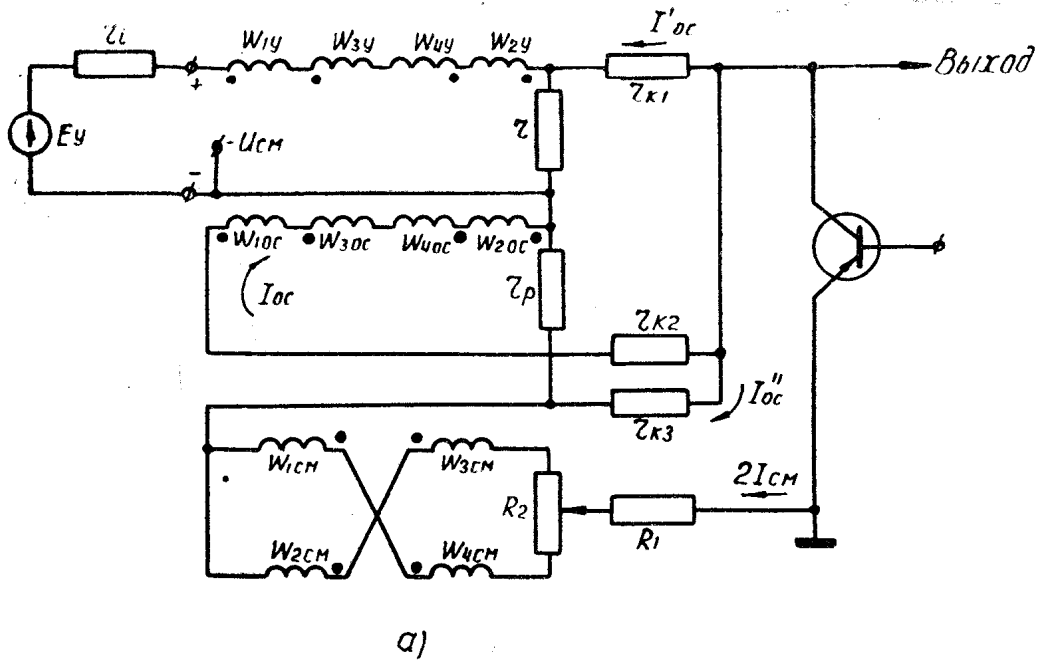
$$R_{вх} = \frac{r_{вх} + r_c}{1 - \beta_2 S_n}.$$

Более интересным оказывается второй случай, который рассмотрим подробнее.

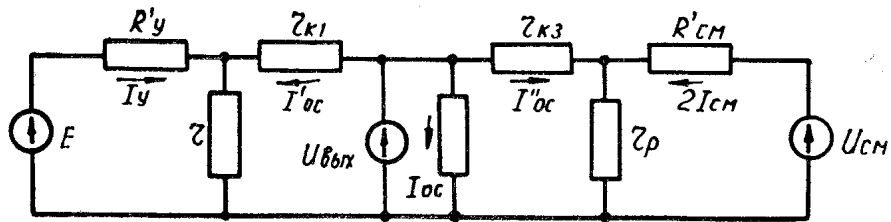
Статическая характеристика ШИМ представляет собой прямую линию (4), наклон которой зависит только от параметров цепи О. С.

Положительным качеством в данном случае является также высокое входное сопротивление ШИМ, которое зависит от сопротивления обмотки управления магнитного модулятора и которое теоретически равно бесконечности. Поскольку дифференциальная чувствительность ШИМ без обратной связи является величиной переменной, то предварительно необходимо обеспечить линейность характеристики, а затем применять обратные связи. На рис. 2 приведены принципиальная и эквивалентная схемы цепей управления, смещения и обратной связи широтно-импульсного модулятора постоянного напряжения.

Предполагается, что полярность входного напряжения не изменяется. Генератор возбуждения и источник питания на рисунке не показаны. Источник постоянного напряжения смещения и питания последнего каскада формирователя является общим, его напряжение равно U_{cm}



а)



б)

Рис. 2

Обозначив через

$$R'_y = r_1 + r_{\text{вх}}; \quad R_{\text{oc}} = r_{\text{к2}} + 4r_{\text{oc}}; \quad R'_{\text{cm}} = R_{\text{cm}}/2, \quad (5)$$

из эквивалентной схемы находим

$$I_y = \frac{E_y (r_{\text{к1}} - r) - U_{\text{вх}} r}{R'_y r_{\text{к1}} + r_{\text{к1}} r + R'_y r}; \quad I'_{\text{oc}} = \frac{U_{\text{вх}} (R'_y + r) - E_y r}{R'_y r_{\text{к1}} + r_{\text{к1}} r + R'_y r};$$

$$I_{\text{oc}} = \frac{U_{\text{вх}}}{R_{\text{oc}}}; \quad I''_{\text{oc}} = \frac{U_{\text{вх}} (R'_{\text{cm}} + r_p) - U_{\text{cm}} r_p}{R'_{\text{cm}} r_{\text{к3}} + R'_{\text{cm}} r_p + r_{\text{к3}} r_p}; \quad (6)$$

$$I_{\text{cm}} = \frac{U_{\text{cm}} (r_{\text{к3}} + r_p) - U_{\text{вх}} r_p}{2(R'_{\text{cm}} r_{\text{к3}} + R'_{\text{cm}} r_p = r_{\text{к3}} r_p)}.$$

Если статическая характеристика ШИМ без О. С. и без коррекции описывается уравнением

$$\tau_H = \frac{S_{io} I_y}{1 \pm \gamma S_{io} I_y'} \quad (7)$$

где $\gamma > 0$ — постоянный коэффициент, имеющий размерность частоты; S_{io} — чувствительность модулятора при $I_y \rightarrow 0$, то длительность выходных импульсов в схеме (рис. 2) в установившемся режиме будет равна:

$$\tau_H = \frac{S_{io} (I_y W_y + I_{oc} W_{oc})}{W_y \left[1 + \frac{\gamma S_{io}}{W_y} (I_y W_y + I_{oc} W_{oc}) \right]} \quad (8)$$

После замены в последнем выражении токов I_y и I_{oc} согласно (6) запишем:

$$\tau_H^2 \gamma U_{cm} f (W_{oc} R_{\vartheta} + W_y R_{oc} r) + \tau_H \left[\frac{W_y}{S_{io}} R_{\vartheta} R_{oc} + \right. \\ \left. + \gamma E_y (r_{k1} + r) W_y R_{oc} - U_{cm} f (W_{oc} R_{\vartheta} - W_y R_{oc} r) \right] = E_y (r_{k1} + r) W_y R_{oc}, \quad (9)$$

где

$$R_{\vartheta} = R_y' r_{k1} + r_{k1} r + R_y' r.$$

Очевидно, что для получения статической характеристики вида

$$\tau_H = \frac{(r_{k1} + r) E_y}{U_{cm} f r} \quad (10)$$

необходимо, чтобы

$$\tau_H \gamma U_{cm} f (W_{oc} R_{\vartheta} - W_y R_{oc} r) + \frac{S_{io}}{W_y} R_{\vartheta} R_{oc} + \gamma E_y (r_{k1} + r) W_y R_{oc} - \\ - U_{cm} f (W_{oc} R_{\vartheta} - W_y R_{oc} r) = U_{cm} f r W_y R_{oc},$$

или

$$\frac{S_{i2} U_{cm} f W_{oc}}{R_{oc} W_y} (1 - \gamma \tau_H) = 1. \quad (11)$$

Если теперь учесть, что при $p=1$ чувствительность модулятора на начальном участке характеристики равна

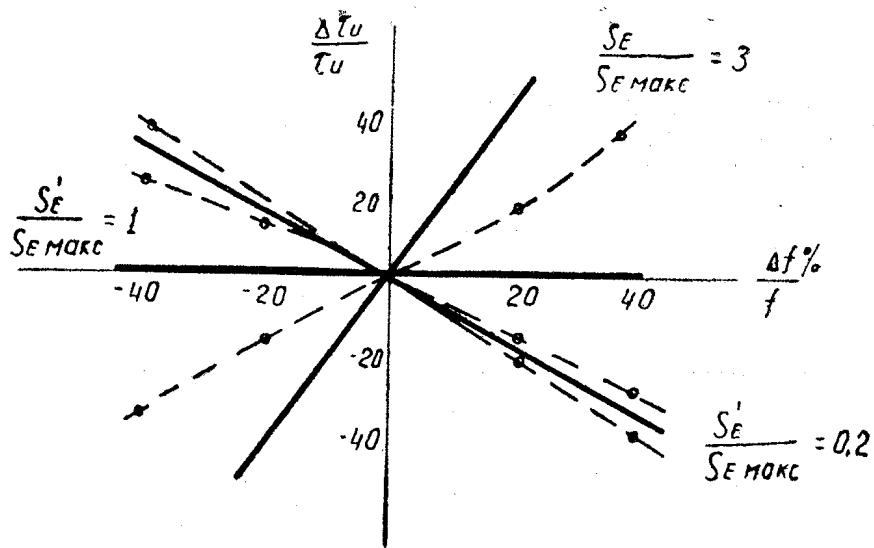
$$S_{io} = \frac{W_y}{2f I_{cm} W_{cm}},$$

то условие (11) сводится к следующему:

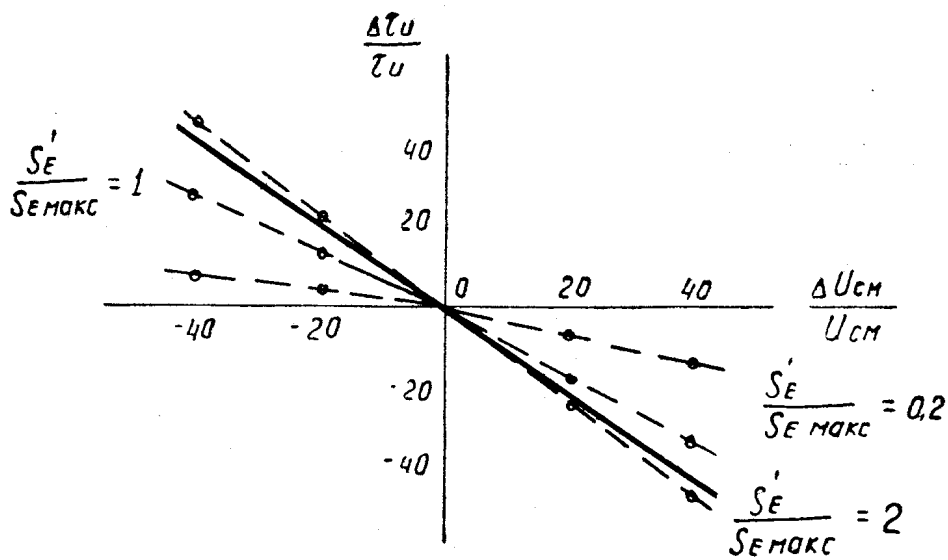
$$I_{cm} = \frac{U_{cm} W_{oc}}{2R_{oc} W_{cm}} (1 - \gamma \tau_H). \quad (12)$$

Таким образом, для получения линейной характеристики, наклон которой зависел бы только от параметров цепи отрицательной обратной связи, следует выполнить условие (11). Заметим, что ток смещения в схеме (рис. 2а) определяется выражением (6), сравнивая которое с (12), можно записать ещё два условия:

$$(11) \quad \frac{W_{oc}}{R_{oc} W_{cm}} = \frac{r_{k3} + r_p}{R_{cm} r_{k3} + R_{cm} r_p + r_{k3} r_p}; \quad \frac{r_p f}{r_{k3} + r_p} = \gamma. \quad (13)$$



a)



б)

Рис. 3

Сопротивление r_p обычно много меньше сопротивления R_{CM} , поэтому окончательно получаем:

$$I_{CM} = \frac{U_{CM}}{R_{CM}} (1 - \gamma \tau_n); \quad R_{CM} = \frac{2R_{OC} W_{CM}}{W_{OC}};$$

$$\frac{r_p}{r_{к3} + r_p} = \gamma; \quad S_E = \frac{r_{к1} + r}{U_{CM} / r}. \quad (14)$$

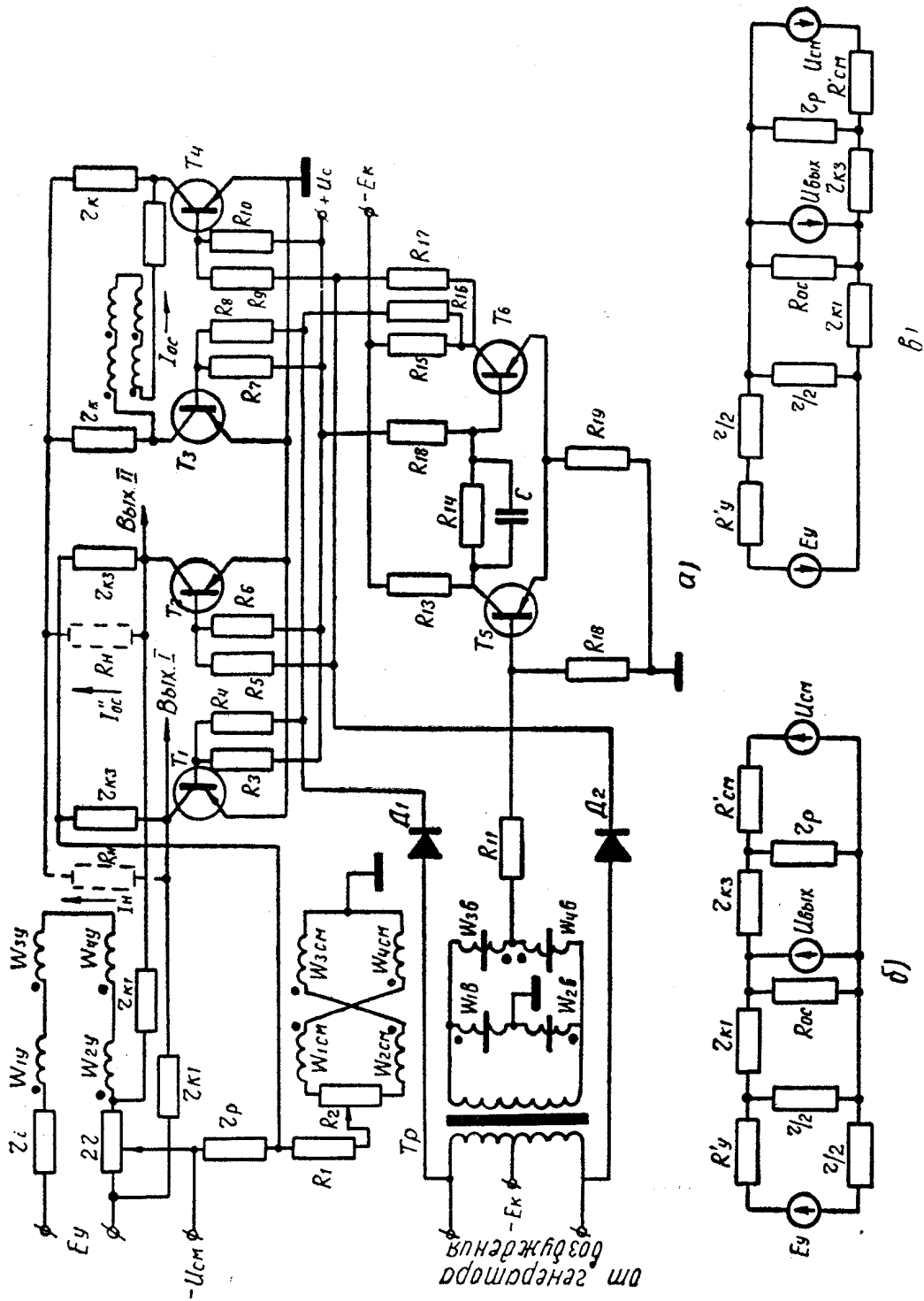


Рис. 4

Рассмотрим теперь погрешности ШИМ с обратными связями.

Поскольку в схеме осуществлена коррекция нелинейности, погрешностью бы можно пренебречь. При изменении параметров схемы возникает погрешность, которая при $r_{к1} \gg r$

$$\frac{\Delta R_{oc}}{R_{oc}} = \frac{\Delta R_{cm}}{R_{cm}}, \quad \frac{\Delta r_{к1}}{r_{к1}} = \frac{\Delta r}{r}; \quad \gamma \tau_n \ll 1$$

равна

$$\delta_{\Delta} = -\frac{\Delta U_{cm}}{U_{cm}} + \frac{W_{oc} r_{к1} (r_i + r_{вх} + r) - q W_y R_{oc} r}{q W_y R_{oc} r} \cdot \frac{\Delta f}{f} + \\ + \frac{W_{oc} r_{к1} (r_i + r_{вх} + r)}{q W_y R_{oc} r} \left(\frac{\Delta B_s}{B_s} - \frac{\Delta U_0}{U_0} \right). \quad (15)$$

Учитывая, что

$$\frac{S'_E}{S_E} = \frac{W_{oc} r_{к1} (r_i + r_{ix} + r)}{W_y R_{oc} r}, \quad (16)$$

получаем

$$\delta_{\Delta} = -\frac{\Delta U_{cm}}{U_{cm}} + \left(\frac{S'_E}{S_{E_{макс}}} - 1 \right) \frac{\Delta f}{f} + \frac{S'_E}{S_{E_{макс}}} \left(\frac{\Delta B_s}{B_s} - \frac{\Delta U_0}{U_0} \right). \quad (17)$$

Здесь S'_E , $S_{E_{макс}}$ — чувствительность ШИМ с П. О. С. и О. О. С. и максимальная чувствительность ШИМ без О. С.

Хорошее совпадение теоретических результатов с экспериментальными можно обнаружить, сравнивая соответствующие зависимости на рис. 3,а, б.

Переходный процесс в ШИМ при скачкообразном изменении является аperiodическим.

Экспериментальные кривые при различной чувствительности и различных коэффициентах η_2 приведены на рис. 3,в. С повышением чувствительности практически пропорционально увеличивается и время переходного процесса.

Анализ результатов эксперимента показывает, что с достаточной степенью точности постоянная времени ШИМ с обратными связями может быть вычислена по формуле:

$$T \approx T_y \cdot \frac{S'_E}{S_{E_{макс}}}, \quad (18)$$

где T_y — постоянная времени цепи управления ШИМ без О. С.

В заключение отметим, что для преобразования напряжений разной полярности можно выполнить ШИМ по схеме, показанной на рис. 4,а. В ней, в отличие от предыдущей, при изменении полярности входного сигнала изменяется полярность напряжения обратной связи, в результате чего входное сопротивление ШИМ всегда высокое.

Изображенные на рис. 4,б, в, эквивалентные схемы входных сигналов разной полярности при малых значениях ничем не отличаются от рассмотренной ранее (рис. 2). Поэтому для модулятора (рис. 4,а) справедливы все условия и характеристики, полученные выше.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. М. Агеев. Статические характеристики магнитно-полупроводникового широтно-импульсного модулятора. Автоматика и телемеханика, № 5, 1967.
2. Ю. М. Агеев. Теоретическое и экспериментальное исследование двухтактного магнитного широтно-импульсного модулятора. Труды XI Всесоюзного совещания по магнитным элементам автоматки и вычислительной техники, Таллин, 1966.