

**Жураев Фаррух Дустмирзаевич**

старший преподаватель

**Аралов Гайрат Мухаммадиевич**

ассистент

Каршинский инженерно-экономический институт

г. Карши, Республика Узбекистан

## ПОГРЕШНОСТИ МАГНИТОМОДУЛЯЦИОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ

***Аннотация:** в данной статье предложены погрешности магнитомодуляционных измерительных устройств постоянного тока.*

***Ключевые слова:** транзистор, импульс, напряжение, аддитив, температура, аппроксимация, система, анализ, контур, магнитопровода, регулирования, синтез, обратной связи, управления.*

В системах контроля и управления процессом подзаряда в автономных источниках питания в качестве преобразователя постоянного тока чаще всего используется магнитомодуляционные преобразователи тока (ММПТ), построенные на основе магнитно-транзисторных мультивибраторов (МТМ) с преобразованием ток-длительность импульса, т.е. с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Схема одного из разработанных ММПТ приведена на рис. 1 [1].

Принцип работы этого датчика заключается в следующем. При отсутствии контролируемого тока  $I_x$  длительности  $T_1$  и  $T_2$  полупериодов генерируемых импульсов при условии симметрии схемы будут равны между собой. При наличии тока  $I_x$ , за счет того, что в один полупериод ток  $I_x$  оказывает намагничивающие действия, а в другой – размагничивающие, длительности  $T_1$  и  $T_2$  становятся неодинаковыми. Следовательно, длительности импульсов  $T_1$  и  $T_2$  являются функцией контролируемого тока  $I_x$ . Выходное переменное напряжение МТМ, несущее информацию о величине и направлении контролируемого постоянного тока, снимается с выходной обмотки трансформатора  $W_{\text{вых}}$ .

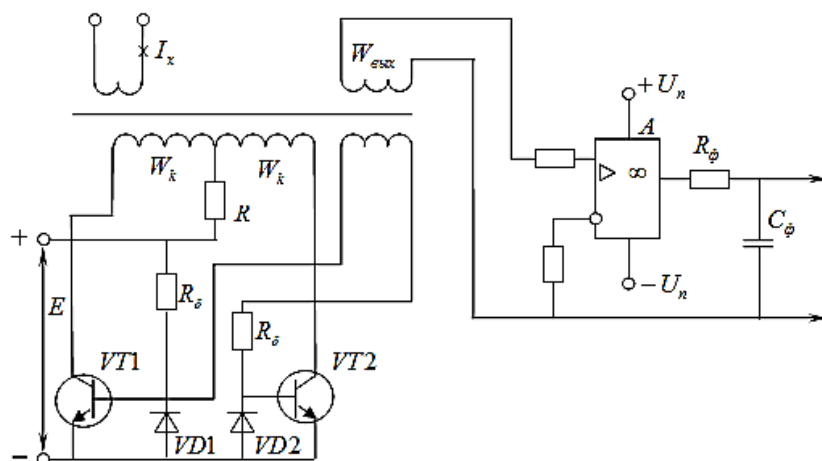


Рис. 1. Магнитомодуляционный преобразователь постоянного тока

Напряжение с выходной обмотки  $W_{\text{вых}}$  подается на вход усилителя – ограничителя, ограничивающего это напряжение сверху и снизу. Длительности импульсов  $T_1$  и  $T_2$  меняются в зависимости от контролируемого тока, а вольт – секундные площади положительных и отрицательных импульсов на обмотке  $W_{\text{вых}}$  равны. После двустороннего ограничения появляются постоянная составляющая, величина которой пропорциональна контролируемому току, а знак зависит от направления этого тока. Переменная составляющая отфильтровывается с помощью фильтра низких частот (ФНЧ).

Одной из основных задач при разработке измерительных преобразователей, в том числе ММПТ, является сведение к минимуму их погрешностей на выходе.

Нами исследованы погрешности ММПТ, построенных на МТМ с ШИМ.

Как известно [1], в нормальном режиме работы объектов контроля и управления вполне достаточно, чтобы ММПТ обладали определенным, наперед заданным временем установления входной величины, которое обеспечивает съем информации в течение времени опроса. В частности, для объектов контроля и управления в виде автономной энергетической системы, время опроса всегда больше времени установления выходного напряжения ММПТ, поэтому достаточно рассмотреть только статическую составляющую погрешности преобразования.

Согласно [2], общая погрешность ММПТ, приведенная ко входу, определяется выражением:

$$U_{\text{вых}} = \frac{\Delta U}{K_{\text{CT}}} \pm \frac{\Delta K}{K_{\text{CT}}} (I_y), \quad (1)$$

где  $K_{\text{CT}}$ ,  $\Delta K$  - статический коэффициент передачи и его приращение.

Первое слагаемое в (1) – это аддитивная составляющая погрешности, второе – мультипликативная.

Одним из источников систематической погрешности является смещение проводника с током относительно центра сердечника. Однако, в случае, когда обмотки преобразователя намотаны на ферромагнитный сердечник с высоким значением магнитной проницаемости, эта погрешность мала [3].

Источниками погрешностей являются изменения параметров элементов ММПТ под воздействием внешних факторов. В нашем случае, это – изменения температуры окружающей среды, давления, влажности, а также внешние электрические и магнитные поля.

Общая погрешность ММПТ выражается через изменения параметров отдельных элементов следующим образом:

$$\Delta U_{\text{вых}} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial U}{\partial v_i} \Delta v_i, \quad (2)$$

где  $v_i$  – изменение  $i$ -ого элемента ММПТ;  $\Delta v_i$  – изменение параметра  $i$  – ого элемента под внешним воздействием;  $n$  – число элементов ММПТ.

Как правило, параметры элементов ММПТ слабо зависят от атмосферного давления и влажности. Защита от внешних электромагнитных полей обеспечивается конструкцией ММПТ: защитными экранами, оптимальным взаимным расположением силовых проводников и измерительных элементов.

Наибольшее влияние на параметры элементов ММПТ (следовательно, на точность) оказывает изменение температуры окружающей среды. В нашем случае температура является основным внешним фактором, воздействующим на элементы ММПТ, поэтому исследованию подлежат прежде всего

систематические температурные погрешности, которые в дальнейшем будут называться просто погрешностями.

Наиболее общим методом анализа погрешностей является, согласно [4], составление уравнения, описывающего работу устройства. Наличие уравнения позволит установить источники погрешностей и наметить способы их устранения. В нашем случае такими уравнениями являются выражения, полученные в [1]. Погрешности ММПТ определяются после анализа этих выражений. При этом основным источником погрешностей считаем изменение температуры окружающей среды.

Для нахождения наиболее эффективных способов уменьшения погрешностей необходимо выяснить в процессе анализа, влияние каких элементов на величину погрешности преобладает, а также определить соотношение между аддитивной и мультипликативной составляющими.

При анализе температурных погрешностей используем выражение (2) для общей погрешности ММПТ и выражение, определяющие зависимость  $U_{вых}(I_y)$ . Выходное напряжение ММПТ пропорционально величине

$$X = \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2},$$

где  $T_1$  и  $T_2$  – длительности полупериодов импульсов находятся по выражениям, полученным в [3].

Выражение (2) перепишем следующим образом:

$$\Delta U_{вых} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial U}{\partial v_i} \Delta v_i = E \left( \frac{\partial X}{\partial R} \Delta R + \frac{\partial X}{\partial R_\sigma} \Delta R_\sigma + \frac{\partial X}{\partial U_\sigma} \Delta U_\sigma + \frac{\partial X}{\partial \beta_1} \Delta \beta_1 + \frac{\partial X}{\partial \beta_2} \Delta \beta_2 + \frac{\partial X}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial X}{\partial i_c} \Delta i_c \right), \quad (3)$$

где  $\Delta R, \Delta R_\sigma, \Delta U_\sigma, \Delta \beta_1, \Delta \beta_2, \Delta \alpha, \Delta i_c$  – это изменения под действием температуры соответственно величин сопротивлений балластного и базового резисторов, падения напряжения на диодах и переходах транзисторов МТМ, коэффициентов усиления по току транзисторов, коэффициента аппроксимации, зависящего от параметров сердечника и коэрцитивной силы сердечника.

Расчеты и эксперименты, проведенные нами, показывают, что изменения параметров сердечника практически не оказывают влияние на величину

погрешности ММПТ по сравнению с влиянием параметров других элементов. Установлено, что погрешность, возникающая при изменении параметров сердечника под воздействием температуры, приблизительно на два порядка ниже, чем погрешности, возникающие при температурных изменениях других параметров. Поэтому в дальнейшем два последних слагаемых в (3) не учитываются.

Температурный коэффициент выходного напряжения равен

$$TKU_{\text{вых}} = \frac{1}{U_{\text{вых}}} \frac{\alpha U_{\text{вых}}}{\alpha t^0} = \frac{E}{U_{\text{вых}}} \left( \frac{\partial X}{\partial R} \frac{\partial R}{\partial t^0} + \frac{\partial X}{\partial R_{\delta}} \frac{\partial R_{\delta}}{\partial t^0} + \frac{\partial X}{\partial U_{\delta}} \frac{\partial U_{\delta}}{\partial t^0} + \frac{\partial X}{\partial \beta_1} \frac{\partial \beta_1}{\partial t^0} + \frac{\partial X}{\partial \beta_2} \frac{\partial \beta_2}{\partial t^0} \right). \quad (4)$$

Относительное изменение аддитивной составляющей погрешности находится из (4) при нулевом токе управления. Мультипликативная составляющая определяется изменением статического коэффициента передачи:

$$\delta_{CT} = \frac{1}{K_{CT}} \frac{\alpha K_{CT}}{\alpha t^0} = \frac{1}{\frac{\alpha U_{\text{вых}}}{\alpha I_y}} \frac{\alpha}{\alpha I_y} \left( \frac{\alpha U_{\text{вых}}}{\alpha I_y} \right). \quad (5)$$

Величина  $K_{CT}$  является нелинейной функцией тока управления  $I_y$ . Однако, в нашем случае наибольший интерес представляет погрешность на линейном участке зависимости  $U_{\text{вых}}(I_y)$ . Для линейного участка характеристики справедливо соотношение:

$$K_{CT} = \frac{\alpha U_{\text{вых}}}{\alpha I_y} \approx \frac{U_{\text{вых}}(I_{y2}) - U_{\text{вых}}(I_{y1})}{I_{y2} - I_{y1}}, \quad (6)$$

где  $I_{y2}, I_{y1}$  – значения тока управления на линейном участке характеристики.

Исследования, проведенные нами, показывают, что в диапазоне температур  $\pm 50^\circ\text{C}$  статический коэффициент передачи ММПТ линейно зависит от температуры окружающей среды. Тогда с учетом (6) выражение (5) перепишется следующим образом:

$$\delta_{CT} = \frac{[U_{\text{вых}}(I_{y2}, t_2^0) - U_{\text{вых}}(I_{y1}, t_2^0)][U_{\text{вых}}(I_{y2}, t_1^0) - U_{\text{вых}}(I_{y1}, t_1^0)]}{[U_{\text{вых}}(I_{y2}, t_1^0) - U_{\text{вых}}(I_{y1}, t_1^0)](t_2^0 - t_1^0)}, \quad (7)$$

где  $t_1^0, t_2^0$  – различные температуры окружающей среды. Абсолютное изменение статического коэффициента передачи ММПТ будет равно:

$$\Delta K = \delta_{CT} K_{CT} (t_2^0 - t_1^0).$$

Здесь:  $K_{CT}$  – это величина статического коэффициента передачи ММПТ при температуре  $t_1^0$ .

Для упрощения процесса расчета погрешностей примем, что температурные зависимости параметров элементов линейны в заданном интервале температур.

Значение абсолютной погрешности ММПТ равно

$$\Delta U_{вых} = U_{вых}(I_y, t_2^0) - U_{вых}(I_y, t_1^0). \quad (8)$$

Поскольку зависимость  $U_{вых}(I_y)$  линейна на рабочем участке, то для определения аддитивной и мультипликативной составляющих погрешности достаточно найти величину  $U_{вых}$  в двух точках: при  $I_y = 0$  и  $I_y = 1A$ . Расчеты этих величины проводились для двух температур:  $0^0C$  и  $30^0C$ . При расчетах не учитывались случайные отклонения в пределах допусков величин  $R, R_{\sigma}, U_{\sigma}, \beta_1, \beta_2$ . При этом использовались номинальные величины сопротивлений резисторов и средние значения параметров других элементов.

Расчеты показали, что наибольший вклад в величину погрешности вносит изменение коэффициентов усиления транзисторов МТМ  $\beta_1, \beta_2$ , причем, чем больше различаются между собой величины  $\beta_1$  и  $\beta_2$  и чем меньше их величина, тем больше температурный дрейф выходного напряжения ММПТ. Для устранения влияния изменения коэффициентов усиления транзисторов МТМ на суммарную погрешность необходимо выбирать транзисторы с возможно более высоким коэффициентом усиления либо применять составные транзисторы. Например, при использовании транзисторов с коэффициентом усиления 100 погрешность ММПТ уменьшается более, чем в три раза.

Для определения условия минимума температурного дрейфа нужно найти относительное изменение величин  $X$  и приравнять его нулю. При этом полагаем, что влияние коэффициентов  $\beta_1$  и  $\beta_2$  устранено выбором транзисторов с достаточно большими коэффициентами усиления. Для получения более простых выражений примем, что петля гистерезиса прямоугольна и ширина его равна нулю. Тогда уравнения работы МТМ для каждого полупериода запишутся следующим образом:

$$\begin{cases} E - i_{k1}R - i_y R = SW_k \frac{\Delta B}{T_1}, \\ E - i_{k2}R - i_y R = SW_k \frac{\Delta B}{T_2}, \end{cases} \quad (9)$$

где  $\Delta B = 2B_m$ ;  $B_m$  – максимальная индукция в сердечнике.

Решая эти уравнения относительно  $T_1$  и  $T_2$ , получаем

$$T_1 = \frac{SW_K \Delta B}{E - i_{k1}R - i_y R}, \quad (10)$$

$$T_2 = \frac{SW_K \Delta B}{E - i_{k2}R + i_y R}. \quad (11)$$

Известно [4]:

$$i_K = i_\delta \frac{W_\delta}{W_K}, \quad (12)$$

$$i_\delta = \frac{\frac{SW_\delta \Delta B}{T_i} - 2U_\delta}{R_\delta}. \quad (13)$$

Подставим значение  $i_K$ ,  $R_\delta$  из (12), (13) в (10), (11) с учетом температурных зависимостей параметров. При этом считаем, что  $KR_\delta = KR$ , так как обычно резисторы  $R$  и  $R_\delta$  выбираются одного типа и имеют приблизительно одинаковую температурную стабильность.

Тогда длительности  $T_1$  и  $T_2$  определяются следующим образом:

$$\begin{cases} T_1 = \frac{SW_K \Delta B (1 + K_B t^0) (1 + \frac{R}{R_\delta})}{E + \frac{2U_\delta (1 + K_U t^0) R W_\delta}{R_\delta W_K} - i_y R (1 + K_R t^0)}, \\ T_2 = \frac{SW_K \Delta B (1 + K_B t^0) (1 + \frac{R}{R_\delta})}{E + \frac{2U_\delta (1 + K_U t^0) R W_\delta}{R_\delta W_K} + i_y R (1 + K_R t^0)}, \end{cases} \quad (14)$$

где  $K_B$  – температурный коэффициент индукции материала сердечника.

Величина  $X$  с учетом (14)

$$X(t^0) = \frac{T_1(t^0) - T_2(t^0)}{T_1(t^0) + T_2(t^0)} = \frac{i_y R (1 + K_R t^0)}{E + \frac{2U_\delta (1 + K_U t^0) R W_\delta}{R_\delta W_K}}.$$

Относительное изменение величины  $X$  :

$$K_X = \frac{1}{X(t^0)} \frac{\alpha X}{\alpha t^0} = \frac{E + \frac{2U_{\delta}RW_K}{R_{\delta}W_{\delta}}(1 + K_U t^0)K_R - \frac{2U_{\delta}RW_K}{R_{\delta}W_{\delta}}K_U(1 + K_R t^0)}{\left[ E + \frac{2U_{\delta}RW_K}{R_{\delta}W_{\delta}}(1 + K_U t^0) \right] (1 + K_R t^0)}.$$

Приравняв  $K_X$  нулю, произведя некоторые упрощения, получаем условие минимума температурного дрейфа выходного напряжения ММПТ [74]:

$$\frac{ER_{\delta}W_{\delta} + 2U_{\delta}RW_{\delta}}{2U_{\delta}RW_{\delta}} = \frac{K_U}{K_R}. \quad (15)$$

Как показывает эксперимент, выполнение условия (15) позволяет уменьшить температурную погрешность ММПТ приблизительно в 1,5 раза без дополнительного усложнения схемы.

Как показывают результаты проведенных нами испытаний, зависимость погрешности  $\Delta U_{\text{вых}}$  от температуры практически линейна в интервале температур  $\pm 50^{\circ}\text{C}$ . Поэтому достаточно исследовать погрешность в области положительных температур.

Для повышения стабильности измерительных устройств широко применяется метод отрицательной обратной связи [1].

Если обозначить  $b$  коэффициент обратной связи, то абсолютная погрешность ММПТ с ООС, приведенная к выходу, определится выражением:

$$\Delta U_{\text{вых}} \approx \frac{\Delta U}{K_{CT}} \left( 1 \pm \frac{\Delta K}{K_{CT}} \right) \pm \frac{1}{bK_{CT}} \frac{\Delta K}{K_{CT}} I_y. \quad (16)$$

Погрешность ММПТ, приведенная ко входу, при отсутствии ООС определяется выражением (1). Из сравнений (16) и (5) следует, что введение ООС уменьшает только мультипликативную погрешность. Аддитивная погрешность, как видно из (16), незначительно изменяется под влиянием ОС. Практически аддитивные погрешности заметно уменьшаются только в тех случаях, когда при введении ООС, чтобы сохранить прежнее значение входного сигнала, увеличивают номинальное для данного ММПТ значение входной величины. В нашем случае величину  $I_y$  можно увеличивать, пропорционально увеличивая сечение калиброванной отпайки во входной цепи.



Определим требуемые параметры цепи ООС, если задана величина погрешности  $\Delta U_{oc}$ . Допустим, погрешность при введении ООС должна уменьшиться в  $m$  раз. Следовательно, во столько же раз следует увеличить ток  $I_y$  во входной цепи. Однако, возможности увеличения тока  $I_y$  ограничены соотношением токов в жгуте и отпайке. Допустим, по отпайке протекает 0,1 часть общего тока, протекающего в жгуте. Следовательно, ток во входной цепи в данном случае можно увеличивать не более, чем в 10 раз.

Коэффициент передачи ММПТ ООС равен:

$$K_{oc} = \frac{K_{CT}}{1 + K_{CT}b}.$$

Выходные напряжения ММПТ без ООС и с ООС:

$$\begin{cases} U_{вых} K_{CT} I_{y1}, \\ U_{выхOC} = K_{oc} I_{y2}, \end{cases} \quad (17)$$

где  $I_{y1}$ ,  $I_{y2}$  - токи во входных цепях ММПТ соответственно без ООС и с ООС.

Приравняв  $U_{вых} = U_{выхOC}$ , получаем из (17) и (16):

$$I_{y2} = I_{y1}(1 + K_{CT}b).$$

Отсюда

$$b = \frac{I_{y2} - I_{y1}}{K_{CT} I_{y1}} = \frac{I_{y2} - I_{y1}}{U_{вых}}. \quad (18)$$

Для рассматриваемого ММПТ имеем:

$$b = W_{oc}/R_{oc}.$$

Коэффициент ООС  $b$  ограничен, во-первых, конечным числом витков в обмотке  $W_{oc}$  и, во-вторых, нагрузочной способностью повторителя. Однако, практика показывает, что, как правило, использовать предельные режимы нет необходимости. Например, для рассматриваемого ММПТ при разомкнутой цепи ООС максимальная погрешность составляла около 2% от максимального сигнала. При замкнутой цепи ООС при неизменном статическом коэффициенте передачи  $K_{CT}$  и соответственно увеличенном входном сигнале эта погрешность составила уже около 0,8%. Параметры ММПТ при этом равны:  $W_3 = 150$ ;  $W_6 = 75$ ;

$R=200 \text{ Ом}; R_{oc}=7,5 \text{ кОм}; W_{oc}=400$ . Коэффициент усиления ОУ – 100. Ожидание уменьшение аддитивной погрешности здесь равно  $1 + K_{ct}b = 3,7$ . Однако, погрешность уменьшалась менее, чем в 3 раза. Это объясняется нестабильностью элементов цепи ООС. Несмотря на это, точность оценки параметров цепи ООС достаточная для расчетов погрешности ММПТ.

Таким образом, исследованием погрешности ММПТ установлено, что ее основным составляющим является изменение температуры окружающей среды. Причем наибольший вклад в температурную погрешность вносит изменение коэффициентов усиления по току транзисторов МТМ. Для уменьшения погрешности необходимо применять в МТМ транзисторы с возможно более высоким коэффициентом усиления ( $\beta \geq 100$ ) и отрицательную обратную связь.

### ***Список литературы***

1. Амиров С.Ф. Статические характеристики магнитомодуляционных датчиков тока / С.Ф. Амиров, Н.О. Атауллаев, Д.Ш. Рустамов // Химическая технология. Контроль и управление. – Ташкент, 2011. – №5.
2. Святочевский А.А. Устройства контроля постоянного тока на магнитно-транзисторных мультивибраторах с широтно-импульсной модуляцией: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск: ТИАСУР, 1987. – 24 с.
3. Хушбоков Б.Х. Многопредельные трансформаторы тока для систем управления устройствами электроснабжения железнодорожного транспорта. Дис. ... канд. техн. наук. – Ташкент: ТашГТУ, 2010. – 193 с.
4. Голованова А.М. Теоретические основы электротехники // Электрические измерения: Учебное пособие для студентов электротехнических специальностей / А.М. Голованова, А.В. Кравцов. – М.: ФГОУ ВПО МГАУ, 2006. – 96 с.