

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПЕРВИЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ (ДАТЧИКИ)

УДК 621.317.445+621.317.311

В. В. БРАЙКО, П. П. ОРНАТСКИЙ,
С. Г. ТАРАНОВ
(Киев)

КОМПЕНСАЦИОННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ С ДАТЧИКАМИ ХОЛЛА*

В статье изложены некоторые вопросы расчета и анализа схем компенсационных преобразователей с датчиками Холла и даны рекомендации по применению этих схем.

Обобщенная схема компенсационного преобразователя состоит из элемента Холла, усилителя и цепей обратной связи (ОС). В зависимости от вида ОС компенсационные преобразователи** с датчиками Холла можно подразделить на преобразователи с компенсацией индукции, напряжения и тока питания датчика. В зависимости от способа подключения цепи ОС к нагрузке компенсационные преобразователи бывают с выходом по току и выходом по напряжению.

На рисунке представлены предложенные авторами схемы компенсационных преобразователей. Преобразователь с компенсацией индукции может быть с выходом по току (см. рисунок, а) и выходом по напряжению (см. рисунок, б). В первом случае индукция B_k , создаваемая соленоидом, в поле которого находится элемент Холла, пропорциональна току $I_{\text{вых}}$, во втором — напряжению на нагрузке $U_{\text{вых}}$. Так как цепь ОС не соединена с цепью питания датчика Холла, то схемы применимы при питании датчика от источника тока (режим заданного тока) и источника напряжения (режим заданного напряжения).

На рисунке, в и г приведены схемы с компенсацией напряжения питания датчика. В схеме рисунка, в выходной величиной является ток, а в схеме рисунка, г — напряжение. В первом случае компенсирующее напряжение U_k на сопротивлении обратной связи $Z_{\text{ОС}}$ пропорционально току в нагрузке $I_{\text{вых}}$, а во втором — напряжению на нагрузке $U_{\text{вых}}$.

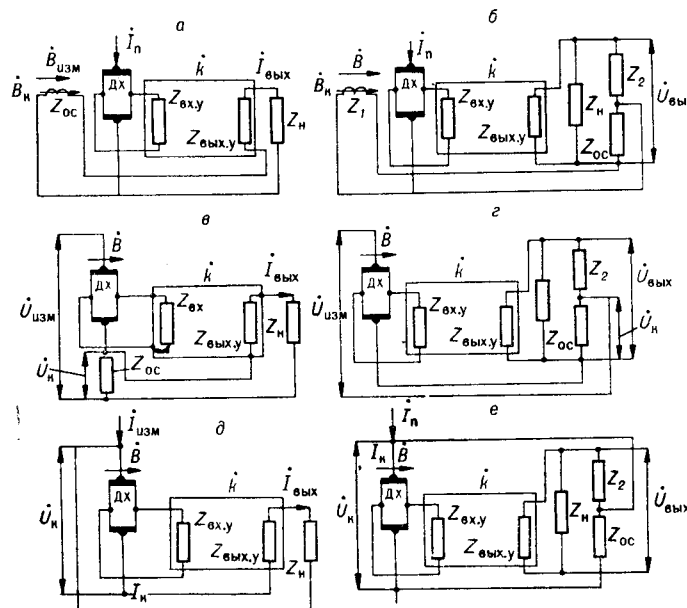
На рисунке, д и е изображены схемы с компенсацией тока питания датчика. В схеме рисунка, д выходной величиной является ток, а в схеме рисунка, е — напряжение. В первом случае компенсирующий ток

* Материал доложен на VII Всесоюзной конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений в сентябре 1965 г. в Новосибирске.

** Согласно ГОСТу 1845—59, приборы с глубокой отрицательной обратной связью называются компенсационными.

i_k пропорционален току в нагрузке $i_{\text{вых}}$, во втором — напряжению на нагрузке $U_{\text{вых}}$.

Во всех случаях характер компенсирующей величины должен соответствовать характеру измеряемой величины: постоянной измеряемой индукции $B_{\text{изм}}$ должна соответствовать постоянная компенсирующая индукция B_k , а переменному измеряемому напряжению $U_{\text{изм}}$ — переменное компенсирующее напряжение U_k и т. д. Для этой цели в некоторых случаях в цепи ОС необходимо использовать выпрямитель.



Перейдем к анализу схем. Определим относительную предельную погрешность схемы рисунка, а [1, 2], считая, что элемент Холла работает в режиме заданного тока (РЗТ), а измеряемой величиной является индукция. Для общности изложения расчет будем выполнять символическим методом.

Индукция, действующая на элемент Холла, равна

$$\Delta \dot{B} = \dot{B}_{\text{изм}} - \dot{B}_k, \quad (1)$$

где $\dot{B}_{\text{изм}}$ — измеряемая индукция, тл;

\dot{B}_k — компенсирующая индукция, тл.

Э. д. с. Холла, создаваемая индукцией $\Delta \dot{B}$ в РЗТ, определяется выражением

$$\Delta \dot{E}_x = \dot{S}_I^B \Delta \dot{B}, \quad (2)$$

где \dot{S}_I^B — чувствительность датчика Холла к индукции в РЗТ, в/тл. Напряжение на входе усилителя будет соответствовать

$$\Delta \dot{U}_{\text{вх.у}} = \Delta \dot{E}_x \frac{Z_{\text{вх.у}}}{Z_{\text{вых}} + Z_{\text{вх.у}}}, \quad (3)$$

где $Z_{вх.у}$ — комплексное входное сопротивление усилителя, *ом*;
 $Z_{вых}$ — выходное сопротивление датчика Холла, *ом*.
 Э. д. с. на выходе усилителя можно найти по формуле

$$\dot{E}_{вых} = \dot{k} \Delta \dot{U}_{вх.у}, \quad (4)$$

где \dot{k} — коэффициент усиления усилителя.
 Ток в нагрузке равен

$$i_{вых} = \frac{\dot{E}_{вых}}{Z_n + Z_{OC} + Z_{вых.у}}, \quad (5)$$

где Z_n — комплексное сопротивление нагрузки, *ом*;
 Z_{OC} — комплексное сопротивление соленоида, создающего индукцию \dot{B}_k , *ом*;
 $Z_{вых.у}$ — комплексное выходное сопротивление усилителя, *ом*.
 Компенсирующая индукция, создаваемая соленоидом, определяется по формуле

$$\dot{B}_k = \frac{L}{\omega F} i_{вых}, \quad (6)$$

где L — приведенная индуктивность соленоида, *гн*;
 ω — число витков соленоида;
 F — поперечное сечение соленоида, *м*².
 Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \dot{k}_1 &= \frac{\Delta \dot{E}_x}{\Delta \dot{B}} = \dot{S}_I^B; & \dot{k}_2 &= \frac{\Delta \dot{U}_{вх.у}}{\Delta \dot{E}_x} = \frac{Z_{вх.у}}{Z_{вых} + Z_{вх.у}}; \\ \dot{k}_3 &= \frac{\dot{E}_{вых}}{\Delta \dot{U}_{вх.у}} = \dot{k}; & \dot{k}_4 &= \frac{\dot{E}_{вых}}{i_{вых}} = \frac{1}{Z_n + Z_{OC} + Z_{вых.у}}; \\ \dot{\beta} &= \frac{\dot{B}_k}{i_{вых}} = \frac{L}{\omega F}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\dot{k}_1, \dot{k}_2, \dot{k}_3, \dot{k}_4$ — коэффициенты преобразования прямой цепи;
 $\dot{\beta}$ — коэффициент ОС.

Решая совместно (1)–(6) и учитывая (7), найдем выражение для тока в нагрузке

$$i_{вых} = \frac{\dot{k}_1 \dot{k}_2 \dot{k}_3 \dot{k}_4 \dot{B}_{изм}}{1 + \dot{k}_1 \dot{k}_2 \dot{k}_3 \dot{k}_4 \dot{\beta}}. \quad (8)$$

Коэффициент преобразования получим путем дифференцирования выражения (8) по $\dot{B}_{изм}$:

$$\dot{k}_n = \frac{\dot{k}_1 \dot{k}_2 \dot{k}_3 \dot{k}_4}{1 + \dot{k}_1 \dot{k}_2 \dot{k}_3 \dot{k}_4 \dot{\beta}}. \quad (9)$$

Предельную относительную погрешность системы можно определить методом логарифмирования с последующим дифференцированием

выражения (9). После ряда преобразований, переходя к конечным приращениям, получим

$$\xi = \frac{\frac{\Delta k_1}{k_1} + \frac{\Delta k_2}{k_2} + \frac{\Delta k_3}{k_3} + \frac{\Delta k_4}{k_4}}{1 + k_1 k_2 k_3 k_4 \beta} + \frac{\Delta \beta}{\beta}. \quad (10)$$

Как видно из (10), погрешность, обусловленная изменением коэффициентов преобразования прямой цепи, уменьшается в $(1 + k_1 k_2 k_3 k_4 \beta)$. Определим абсолютную погрешность в выходном значении тока $\Delta \dot{I}_{\text{вых}}$, возникающую за счет напряжения дрейфа нуля датчика \dot{U} . Напряжение, поступающее на вход усилителя, если измеряемая индукция равна нулю, находится по формуле

$$\Delta \dot{U}_{\text{вх. у}} = \dot{k}_2 (\dot{U}_{\text{др}} - \Delta \dot{I}_{\text{вых}} \dot{k}_1 \beta).$$

Искомая величина $\Delta \dot{I}_{\text{вых}}$ по аналогии с предыдущим определяется из выражения

$$\Delta \dot{I}_{\text{вых}} = \frac{\dot{U}_{\text{др}} \dot{k}_2 \dot{k}_3 \dot{k}_4}{1 + \dot{k}_1 \dot{k}_2 \dot{k}_3 \dot{k}_4 \beta}. \quad (11)$$

При $k_1 k_2 k_3 k_4 \beta \gg 1$ выражение (11) упрощается:

$$\Delta \dot{I}_{\text{вых}} = \frac{\dot{U}_{\text{др}}}{\dot{k}_1 \beta}. \quad (12)$$

Если датчик Холла используется в режиме заданного напряжения (РЗН), все конечные выражения остаются прежними, только в (7) вместо \dot{S}_I^B следует подставлять \dot{S}_U^B (чувствительность к индукции в РЗН).

Рассмотрим коэффициенты преобразования прямой цепи, коэффициент обратной связи и области применения схем (см. рисунок, б—е).

Преобразователь с компенсацией индукции и выходом по напряжению (см. рисунок, б). Коэффициенты преобразования прямой цепи:

$$\dot{k}_1 = \frac{\Delta \dot{E}_x}{\Delta \dot{B}} = \dot{S}_I^B;$$

$$\dot{k}_2 = \frac{\Delta \dot{U}_{\text{вх. у}}}{\Delta \dot{E}_x} = \frac{Z_{\text{вх. у}}}{Z_{\text{вых}} + Z_{\text{вх. у}}};$$

$$\dot{k}_3 = \frac{\dot{E}_{\text{вых}}}{\Delta \dot{U}_{\text{вх. у}}} = \dot{k};$$

$$\dot{k}_4 = \frac{\dot{U}_{\text{вых}}}{\dot{E}_{\text{вых}}} = \frac{Z_{\text{пар}}}{Z_{\text{вых. у}} + Z_{\text{пар}}},$$

где

$$Z_{\text{пар}} = \frac{Z_{\text{н}}(Z_2 + Z'_{\text{ос}})}{Z_{\text{н}} + Z_2 + Z'_{\text{ос}}};$$

$$Z'_{\text{ос}} = \frac{Z_{\text{ос}} Z_1}{Z_{\text{ос}} + Z_1}.$$

Коэффициент обратной связи равен $\beta = \frac{\dot{E}_{\text{к}}}{\dot{U}_{\text{вых}}} = \frac{Z'_{\text{ос}} L}{(Z'_{\text{ос}} + Z_2) Z_1 \omega F}$.

При использовании датчика Холла в РЗН все выражения сохраняют прежний вид (\dot{S}_I^B следует заменить \dot{S}_U^B). Схема рисунка, б может быть использована в тех же случаях, что и схема рисунка, а, если сопротивление нагрузки велико.

Преобразователь с компенсацией напряжения и выходом по току (см. рисунок, в). Коэффициенты преобразования прямой цепи:

$$\dot{k}_1 = \frac{\Delta \dot{E}_{\text{x}}}{\dot{U}_{\text{изм}} - \dot{U}_{\text{к}}} = \dot{S}^U,$$

где \dot{S}^U — чувствительность датчика к напряжению питания;

$$\dot{k}_2 = \frac{\Delta \dot{U}_{\text{вх. у}}}{\Delta \dot{E}_{\text{x}}} = \frac{Z_{\text{вх. у}}}{Z_{\text{вых}} + Z_{\text{вх. у}}};$$

$$\dot{k}_3 = \frac{\dot{E}_{\text{вых}}}{\Delta \dot{U}_{\text{вх. у}}} = \dot{k};$$

$$\dot{k}_4 = \frac{\dot{I}_{\text{вых}}}{\dot{E}_{\text{вых}}} = \frac{1}{Z_{\text{вых. у}} + Z_{\text{н}} + Z'_{\text{ос}}};$$

где

$$Z'_{\text{ос}} = \frac{Z_{\text{ос}}(Z_{\text{вх}} + Z_{\text{н}})}{Z_{\text{ос}} + Z_{\text{вх}} + Z_{\text{н}}};$$

$Z_{\text{н}}$ — выходное сопротивление измерительной цепи, ом;

$Z_{\text{вх}}$ — сопротивление между токовыми электродами датчика, ом.

Коэффициент обратной связи равен $\beta = \frac{\dot{U}_{\text{к}}}{\dot{I}_{\text{вых}}} = Z'_{\text{ос}} \approx Z_{\text{ос}}$.

Преобразователь с компенсацией напряжения и выходом по току следует использовать в тех случаях, когда сопротивление нагрузки незначительно, а индукция достаточно велика (не менее 0,1—0,2 тл). Последнее необходимо для получения достаточной глубины ОС. Схема обеспечивает высокое входное сопротивление и может применяться для преобразования постоянного напряжения в переменное. Ее очевидное преимущество — отсутствие дрейфа нуля датчика: при отключенном источнике питания датчика и любом значении магнитной индукции э. д. с. Холла равна нулю (сказанное относится ко всем приведенным схемам). Перспективным является применение данной схемы во входном преобразователе лампового или транзисторного усилителя постоянного тока, так как в подобном преобразователе дрейф нуля не может возникнуть. При достаточной глубине обратной связи изменение характеристик датчика Холла, усилителя и магнитной индукции практически не влияют на коэффициент преобразования.

Преобразователь с компенсацией напряжения и выходом по напряжению (см. рисунок, г). Коэффициенты преобразования прямой цепи:

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{\Delta \dot{E}_x}{\dot{U}_{изм} - \dot{U}_к} = \dot{S}^U; \\ k_2 &= \frac{\Delta \dot{U}_{вх.у}}{\Delta \dot{E}_x} = \frac{Z_{вх.у}}{Z_{вых} + Z_{вх.у}}; \\ k_3 &= \frac{\dot{E}_{вых}}{\Delta \dot{U}_{вх.у}} = k; \\ k_4 &= \frac{\dot{U}_{вых}}{\dot{E}_{вых}} = \frac{Z_{пар}}{Z_{вых.у} + Z_{пар}}, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} Z_{пар} &= \frac{Z_n (Z_2 + Z'_{OC})}{Z_n + Z_2 + Z'_{OC}}; \\ Z'_{OC} &= \frac{Z_{OC} (Z_{вх} + Z_n)}{Z_{OC} + Z_{вх} + Z_n}. \end{aligned}$$

Коэффициент обратной связи равен $\dot{\beta} = \frac{\dot{U}_к}{\dot{U}_{вых}} = \frac{Z'_{OC}}{Z_2 + Z'_{OC}}$.

Схема рисунка, г аналогична схеме рисунка, в и может применяться в тех же случаях, если сопротивление нагрузки велико.

Преобразователь с компенсацией тока и выходом по току (см. рисунок, д). Коэффициенты преобразования прямой цепи:

$$k_1 = \frac{\Delta \dot{E}_x}{\dot{I}_{изм} - \dot{I}_к} = \dot{S}^I,$$

где \dot{S}^I — чувствительность датчика Холла к току питания;

$$\begin{aligned} k_2 &= \frac{\Delta \dot{U}_{вх.у}}{\Delta \dot{E}_x} = \frac{Z_{вх.у}}{Z_{вых} + Z_{вх.у}}; \\ k_3 &= \frac{\dot{E}_{вых}}{\Delta \dot{U}_{вх.у}} = k; \\ k_4 &= \frac{\dot{I}_{вых}}{\dot{E}_{вых}} = \frac{1}{Z_{вых.у} + Z_n + Z_{пар}}, \end{aligned}$$

где

$$Z_{пар} = \frac{Z_n Z_{вх}}{Z_n + Z_{вх}}.$$

Коэффициент обратной связи равен $\dot{\beta} = \frac{\dot{I}_н}{\dot{I}_{вых}} = \frac{Z_{пар}}{Z_{вх}}$.

Схема рисунка, д во многом напоминает схему рисунка, в. Отличительной особенностью является низкое входное сопротивление. Сопротивление датчиков Холла, выполненных из сурьмянистого и мышьяковистого индия, составляет доли ома и уменьшается благодаря действию

ОС в $1+k_1k_2k_3k_4\beta$ раз, поэтому схему следует применять в преобразователях постоянного тока в переменный, имеющих низкое входное сопротивление, достигающее десятых и сотых долей ома. Такой преобразователь можно использовать в амперметрах постоянного тока в качестве звена, предшествующего ламповому или транзисторному усилителю переменного тока.

Преобразователь с компенсацией тока и выходом по напряжению (см. рисунок 1, е). Коэффициенты преобразования прямой цепи:

$$k_1 = \frac{\Delta \dot{E}_x}{i_{изм} - i_k} = S^I;$$

$$k_2 = \frac{\Delta \dot{U}_{вх.у}}{\Delta \dot{E}_x} = \frac{Z_{вх.у}}{Z_{вых} + Z_{вх.у}};$$

$$k_3 = \frac{\dot{E}_{вых}}{\Delta \dot{U}_{вх.у}} = k;$$

$$k_4 = \frac{\dot{U}_{вых}}{\dot{E}_{вых}} = \frac{Z_{пар}}{Z_{вых.у} + Z_{пар}},$$

где

$$Z_{пар} = \frac{Z_n(Z_2 + Z'_{OC})}{Z_n + Z_2 + Z'_{OC}};$$

$$Z'_{OC} = \frac{Z_{OC}Z_{вх}}{Z_{OC} + Z_{вх}}.$$

$$\text{Коэффициент обратной связи равен } \beta = \frac{i_k}{\dot{U}_{вых}} = \frac{1}{Z_{вх}}.$$

Схема рисунка, е аналогична схеме рисунка, в и может применяться в тех же случаях, если нагрузка усилителя имеет большое входное сопротивление.

Схемы с положительными обратными связями (ПОС) следует применять тогда, когда необходимо повысить чувствительность датчика к входной величине. Для этого могут быть использованы предложенные авторами блок-схемы с отрицательными обратными связями (ООС). Выбор параметров усилителя и цепей ОС должен обеспечивать совпадение полярности и фазы индукции, тока или напряжения обратной связи со входным сигналом. Нетрудно показать, что все выведенные расчетные формулы для схем с ООС справедливы и для схем с ПОС, только знак коэффициента обратной связи β необходимо изменить на обратный. Как следует из конечных выражений, ток, напряжение на нагрузке, чувствительность, а также относительная предельная погрешность измерения увеличиваются в $1/1-k_1k_2k_3k_4\beta$ раз. Выбор допустимой величины коэффициента усиления следует производить из условия устойчивости.

Разработанные устройства могут найти применение в измерителе магнитной индукции слабых постоянных магнитных полей, в преобразователе постоянного тока в переменный, в устройстве для измерения коэрцитивной силы магнитомягких материалов и т. д.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. Б. Карандеев, Л. Я. Мизюк. К анализу автокомпенсационных схем.— Научн. записки Львовск. политехн. ин-та, вып. 79, 1961.
2. П. П. Орнатский. Автоматические измерительные приборы. Киев, изд-во «Техніка», 1965.

*Поступила в редакцию
16 сентября 1965 г.*
