

Исследование методов уменьшения порога чувствительности средств измерений с пассивными индукционными первичными измерительными преобразователями предназначенных для измерения первой производной по времени от магнитной индукции

Лукин Е.В.

ОАО «НИИ Электромера», г.Санкт-Петербург

Аннотация

Приведена классификация методов снижения порога чувствительности средств измерений первой производной по времени от магнитной индукции переменного магнитного поля с пассивными индукционными преобразователями. Рассмотрены особенности методов и целесообразность их использования для построения высокочувствительных средств измерений. Наиболее эффективным наряду с увеличением коэффициента преобразования первичного измерительного преобразователя (ПИП) является оптимальное согласование параметров ПИП и шумовых характеристик подключаемых к ПИП усилительных элементов в требуемом частотном диапазоне измеряемой физической величины.

Наибольшее применение в широкополосных средствах измерений первой производной по времени от магнитной индукции, используемых в интересах ВМФ РФ в диапазоне от единиц и долей Гц до единиц и десятков кГц, преимущественное применение получили неподвижные индукционные преобразователи (ИП) с сердечником, выходной сигнал которых:

$$e_{\text{ип}} = -W_{\text{ип}} \cdot S_c \cdot \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \cos \theta \frac{\partial B_{\text{и}}}{\partial t}, \quad (1)$$

где $W_{\text{ип}}$ – число витков катушки; S_c – площадь поперечного сечения сердечника; μ_r – магнитная проницаемость тела; μ_0 – магнитная постоянная; θ – угол между магнитной осью ИП и направлением составляющей вектора магнитной индукции $B_{\text{и}}$ [1].

Разработка методов уменьшения порога чувствительности средств измерений (СИ) первой производной по времени от магнитной индукции, является стратегической задачей и предопределяет изучение и последующее уменьшение шумовых характеристик различных узлов морских технических объектов (МТО), что способствует повышению скрытности и защищённости МТО в области низкочастотных электромагнитных полей.

Порог чувствительности СИ можно представить как:

$$P_n = \frac{e_{\text{шз}}}{G} = \frac{U_{\text{шз}}}{W_{\text{ип}} \cdot S_3}, \quad (2)$$

где $e_{\text{шз}}$ – эквивалентное электрическое напряжение шума, приведенное к входу ИП; S_3 – площадь эквивалентного сечения сердечника; G – коэффициент передачи первичного измерительного преобразователя.

В высокочувствительных (низкопороговых) средствах измерений, с целью нормирования и усиления $e_{\text{ип}}$ до значения, необходимого для передачи, преобразования и представления информации, как правило, используют предварительный усилитель (ПУ).

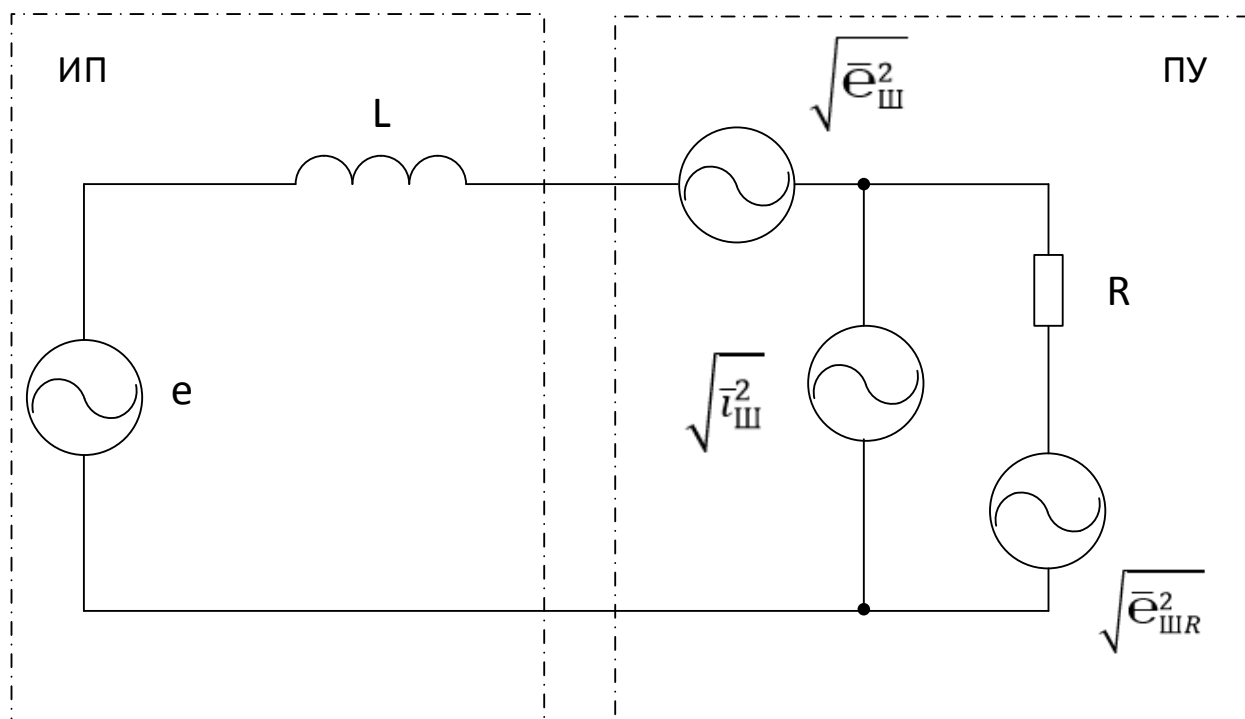


Рисунок 1. Эквивалентная схема средства измерений с индукционными измерительными преобразователями.

На рисунке 1 приведена эквивалентная схема средства измерений с индукционными измерительными преобразователями, из которой следует, что суммарное напряжение шумов $\overline{e_{шэ}}$, приведенное к входу предварительного усилителя:

$$\overline{e_{шэ}} = \sqrt{\overline{e_{ш}^2} + \overline{i_{ш}^2} \cdot Z_{И}^2 + \overline{e_{шR}^2} \left(\frac{Z_{И}^2}{R^2}\right)} \quad (3),$$

где $\overline{e_{ш}^2}$, $\overline{i_{ш}^2}$ – эквивалентное напряжение шума и тока шума ПУ, приведенные к входу ПУ; $Z_{И}$ – эквивалентное полное сопротивление ИП; R – активное сопротивление утечки или резистора смещения, включённого на входе усилительного элемента; $\overline{e_{шR}^2}$ – эквивалентное напряжение теплового шума сопротивления R .

Подставляя выражение (2) в (3) порог чувствительности можно записать как:

$$P_n = \frac{\sqrt{\overline{e_{ш}^2} + \overline{i_{ш}^2} \cdot Z_{И}^2 + \overline{e_{шR}^2} \left(\frac{Z_{И}^2}{R^2}\right)}}{G} = \frac{\sqrt{\overline{e_{ш}^2} + \overline{i_{ш}^2} \cdot Z_{И}^2 + \overline{e_{шR}^2} \left(\frac{Z_{И}^2}{R^2}\right)}}{W_{ИП} \cdot S_{Э}} \quad (4).$$

Уменьшение порога чувствительности P_n (увеличения соотношения сигнал/шум $n_{ш} = e_{ИП} / \overline{e_{шэ}}$) предполагает два основных решения:

- увеличение коэффициента передачи ИП (G);
- уменьшение приведенного к выходу ИП (входу ПУ) эквивалентного напряжения шума $\overline{e_{шэ}}$.



Рисунок 2. Классификация методов уменьшения порога чувствительности СИ ИП

На рисунке 2 приведена классификация методов уменьшения порога чувствительности средств измерений ИП.

Уменьшение эквивалентного напряжения шума, приведенного к выходу ИП без изменения его параметров, может быть осуществлено с помощью использования на входе предварительного усилителя согласующего трансформатора. При малых значениях индуктивности $L_{ИП}$, включение повышающего трансформатора, равносильно увеличению коэффициента передачи (G) в $G_{тр}$ раз (где $G_{тр}$ – коэффициент преобразования трансформатора), уровень напряжения шума при этом остается неизменным, при условии $Z_{и} = Z_{и} \cdot G_{тр}^2 < X_{L_{опт}}$, где $X_{L_{опт}}$ – оптимальное индуктивное сопротивление ИП.

Применение согласующего трансформатора в области больших значений X_L (при больших значениях индуктивности) затруднительно, а в широком диапазоне частот и вовсе невозможно.

Существенным методом снижения P_n является повышение коэффициента передачи ИП, за счет увеличения эквивалентной площади $S_3 \sim \mu_\phi \cdot W_{ИП}$. Увеличение магнитной проницаемости формы ИП μ_ϕ , приводит к существенному увеличению габаритных размеров ИП. Увеличение числа витков не всегда допустимо, так как приводит к увеличению $L_{ИП}$ индуктивности ИП и как следствие, к увеличению собственных шумов усилителя.

Для $B_{и}$, направление вектора, которого совпадает по направлению с магнитной осью ИП (когда $\theta = 0^\circ$), коэффициент передачи:

$$G_{ИП} = -W_{ИП} \cdot S_c \cdot \mu_T \cdot \mu_0 \quad (5).$$

В высокочувствительных СИ используют ИП с относительно длинными сердечниками, для которых с достаточной для инженерных расчетов точностью проницаемость формы:

$$\mu_\phi \approx 0,2 \cdot l_c^2 / S_c \quad (6),$$

где l_c – длина сердечника.

Увеличение магнитной проницаемости материала сердечника (μ_m) имеет смысл лишь для выполнения условия $\mu_\phi \approx \mu_T$, так как $\mu_T = (\mu_m \cdot \mu_\phi) / (\mu_m + \mu_\phi)$ и тогда:

$$G_{ИП} = -0,2 \cdot W_{ИП} \cdot l_c^2 \cdot \mu_0 \quad (7).$$

В этом случае простым решением увеличения отношения сигнал/шум является увеличение длины сердечника до максимально возможной, ограничиваемой конструктивными или иными соображениями.

Отсутствие зависимости $G_{ип}$ от площади поперечного сечения S_c сердечника позволяет уменьшить ее до минимально возможного значения, что (при прочих равных условиях), позволяет в катушке вместо сплошного сердечника использовать систему стержней. В секционированных индукционных преобразователях с сердечниками наличие магнитной связи между сердечниками уменьшает коэффициент преобразования каждого отдельного сердечника по сравнению с его значением при бесконечном удалении сердечников. Взаимное влияние двух сердечников, определяемое по формуле $N_{взи} = \frac{\mu_{\phi} - \mu_{\phi.c}}{\mu_{\phi} \cdot \mu_{\phi.c}}$ [1], (где μ_{ϕ} , $\mu_{\phi.c}$ – проницаемость формы уединенного сердечника и того же сердечника в системе, соответственно), приводит к уменьшению μ_{ϕ} каждого из них.

При условии выбора оптимального отношения α_i/l_c , (α_i – расстояние между стержнями, l_c – длина сердечника), удовлетворяющего попаданию в интервал $0,05 \leq \alpha_i/l_c \leq 0,6$ [1], для описания выходного сигнала используют следующее выражение:

$$e_{ип} = e_{ипi} \cdot n / (1 + 0,03 \cdot l_c \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{\alpha_i}), \quad (8)$$

где n – число стержней, α_i – расстояние между стержнями, $e_{ипi}$ – выходной сигнал катушки, содержащий один стержень.

Корректируя диаметр $D_{ип}$, описанный вокруг сплошного сердечника и принимая во внимание условие влияния сердечников, друг на друга, получаем систему сердечников, размещая, в откорректированном диаметре $D_{ипкор}$ равноудаленные друг от друга сердечники. Для катушек с сердечником, выполненным в виде квадратного поперечного сечения, увеличение коэффициента передачи предполагает замену сплошного сердечника на систему из четырех размещаемых по углам стержней:

$$e_{ип} = e_{ипi} \cdot n / [1 + 0,05 \cdot (n - 1,4) \cdot l_c / D_{ипкор}] \quad (9).$$

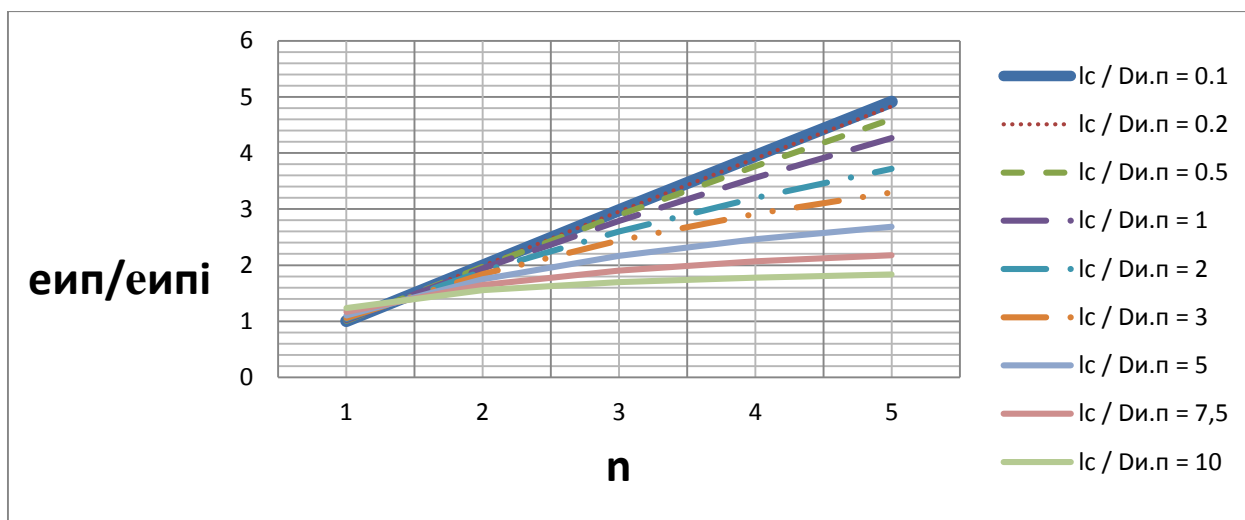


Рисунок 3. Зависимости относительной выходной э.д.с. ИП при изменении числа стержней.

На рисунке 3 приведены результаты расчетов по формуле (9) для отношения $e_{ип}/e_{ипi}$ при различных значениях $l_c/D_{ипкор}$. Анализируя характер зависимостей, можно сделать вывод, что при $l_c/D_{ипкор} \geq 5$ увеличение количества стержней свыше 4-х вряд ли целесообразно [1, 2].

Приведенное выражение (9) справедливо, если длины стержней и сплошного сердечника равны. Использование четырех спиц вместо сплошного сердечника в секции и увеличения кол-ва секций (N) обеспечивает увеличение коэффициента передачи ИП, но требует увеличения поперечных размеров ИП. При этом предполагается, что $\mu_{\phi.c} > \mu_{\phi}$, и для сохранения независимости $G_{ип}$ от воздействия внешних влияющих факторов проницаемость формы одного стержня должна быть, по крайней мере, в 3..5 раз меньше начальной проницаемости материала сердечника и поэтому использование материалов наименее подверженных влиянию внешних влияющих факторов, к примеру, аморфного пермаллоя. В частности при $N=4$ увеличение коэффициента передачи ИП обеспечивается не менее чем в 2 раза.

При индуктивном характере сопротивления вторым слагаемым в выражении (3) можно пренебречь, ввиду малого значения активного сопротивления обмотки, индуктивная же составляющая X_L полного сопротивления $Z_{и}$ изменяется в диапазоне от (20..50) до $(1..2) \cdot 10^5$ Ом при верхней границе диапазона $F_{в}$.

Указанное предполагает возрастающее влияние второго слагаемого в приведенном выражении:

$$\overline{e_{шз}} = \sqrt{e_{ш}^2 + (i_{ш}^2 \cdot Z_{И}^2)} \quad (10).$$

Данные расчета порога чувствительности СИ, основанного на графических зависимостях $e_{ш}$ и $i_{ш}$ [3], одного из лучших по шумовым характеристикам полевых транзисторов (ПТ) – 2n5524, позволяют уменьшить порог чувствительности СИ [2].

Параллельное включение нескольких ПТ, теоретически позволяет увеличить соотношение сигнал/шум ($n_{ш} = e_{инп} / \overline{e_{шз}}$) в \sqrt{k} раз (где k - количество параллельно подключаемых ПТ). Применение в индукционном преобразователе четырех параллельных секций и использование в ПУ двух параллельно работающих ПТ позволяет уменьшить порог чувствительности рассматриваемых средств измерений на 6 дБ [2].

При значениях полного сопротивления источника, в диапазоне от 100 кОм до 100 МОм, где преобладает шум тока, наилучшими шумовыми характеристиками, а именно шумом тока, обладают усилители на полевых транзисторах. Биполярно-транзисторные усилители обеспечивают наилучшие шумовые характеристики в области полного сопротивления от 20 Ом до 1 МОм [3].

Уменьшение порога чувствительности может быть достигнуто путем оптимального согласования выходного сопротивления первичного измерительного преобразователя с шумовыми характеристиками вторичного измерительного преобразователя (предварительного усилителя), что предопределяет разделение частотного диапазона измеряемой величины магнитного поля и использование в каждом поддиапазоне усилительных элементов, обеспечивающих минимальное значение собственных шумов в соответствующих поддиапазонах и последующее суммирование выходных сигналов предварительного усилителя.

Литература

1. Г.В. Абрамзон Индукционные измерительные преобразователи переменных магнитных полей. Энергоатомиздат, 1984.— 117 с.
2. Ю.С. Бедов, Е.В. Лукин, М.П. Романцов. Журнал «Приборы» №8. 2013 г. Анализ методов уменьшения порога чувствительности широкополосных средств измерений первой производной по времени от магнитной индукции.
3. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники.. Пер. с англ. – Изд. 2-е. М.: Издательство БИНОМ, 2014. – 704 с.