

## ПОВЫШЕНИЕ РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЫ МОСТОВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

**М. Н. ПОГУЛЯЕВ, Л. В. ВЕППЕР**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

### Введение

В [1] представлена методика оптимального синтеза высокочастотных электромагнитных преобразователей традиционного мостового исполнения, широко применяемых в автономных электрогидравлических виброисточниках [2]. Использование разработанной методики позволяет достаточно быстро произвести оценку влияния на величину его резонансной (собственной) частоты основных параметров вектора исходных данных. В таблице приведены собственные частоты базового электромеханического преобразователя (ЭМП), используемого в вибросейсмических комплексах типа СВ и СВП, соответствующие различным значениям полной мощности источника электропитания, магнитной индукции в зазорах от постоянных магнитов и начальной величины воздушных зазоров.

### Зависимость собственной частоты мостового ЭМП от конструктивных и электромагнитных параметров

Величина воздушного зазора, мм	Значение магнитной индукции в зазоре, Тл	Собственная частота, Гц, при токе, А				
		2,0	3,0	3,5	4,0	5,0
0,8	0,8	582,4	625,3	642,6	658,7	675,6
	1,0	639,6	687,2	704,3	727,1	748,2
	1,2	671,5	709,4	731,2	743,8	768,4
1,0	0,8	570,8	624,7	641,3	657,7	674,5
	1,0	626,9	667,1	683,2	706,4	727,1
	1,2	656,4	697,3	719,1	730,8	756,8
1,2	0,8	548,7	596,2	613,0	629,3	646,0
	1,0	605,3	656,4	672,3	695,5	716,7
	1,2	640,2	680,3	702,3	714,2	732,9

При выполнении этих расчетов поочередно варьировался только один из указанных параметров, а значения других при этом оставались неизменными. Изменение полной мощности источника электропитания осуществлялось при постоянном напряжении на его выходе  $U_{\text{п}} = 24$  В за счет изменения максимального выходного тока.

### Постановка задачи

Анализ полученных результатов показывает, что повысить собственную частоту ЭМП можно за счет увеличения максимально допустимого тока источника электропитания, повышения магнитной индукции в воздушных зазорах от постоянных магнитов и уменьшение величины самого воздушного зазора.

Однако практическая реализация данных рекомендаций в ряде случаев вызывает затруднения. Так, увеличение максимально допустимого тока источника требует создания нового, более мощного автономного источника управления взамен существующего, что не

всегда технически и экономически оправдано. Повышение магнитной индукции в воздушных зазорах требует применения дорогих высококоэрцитивных постоянных магнитов на основе интерметаллических соединений кобальта с редкоземельными элементами. При уменьшении воздушного зазора возникает опасность перехода ЭМП в релейный режим работы с залипанием якоря у одной из пар полюсов. Кроме того, ужесточаются требования к симметричности и точности выполнения воздушных зазоров. В связи с этим электромагнитные мостовые преобразователи обычно выполняются с величиной воздушного зазора в среднем положении якоря не менее 0,8...1,0 мм. Другим возможным способом повышения собственной частоты мостовых электромагнитных преобразователей является изменение их конструктивной схемы, позволяющее уменьшить начальную величину воздушного зазора и избежать возникающих при этом проблем.

### Основная часть

Одним из таких изменений может считаться замена плоскопараллельного (равномерного по длине якоря) воздушного зазора на дуговой (рис. 1). Это возможно сделать потому, что при повороте якоря точки, расположенные дальше от оси вращения, перемещаются на большее расстояние, чем точки, находящиеся ближе к ней. Таким образом, воздушный зазор с внешней и внутренней сторон полюса можно выполнить различным по величине. Наиболее целесообразно принять эту величину прямо пропорциональной расстоянию от сторон полюса до оси торсиона, поскольку при этом значение относительного перемещения будет одинаково для всех точек якоря, находящихся под полюсом. Такая конфигурация зазора не препятствует свободному перемещению якоря и одновременно позволяет уменьшить его эффективный размер.

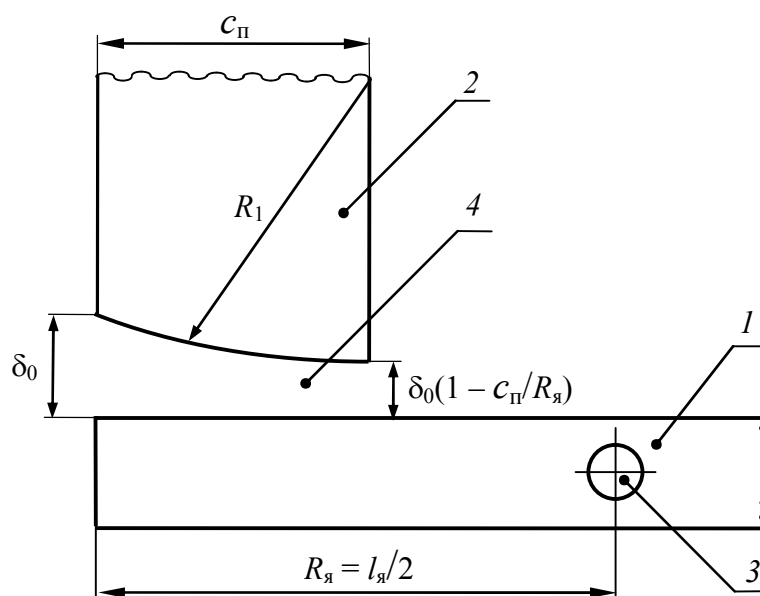


Рис. 1. Фрагмент ЭМП с дуговым воздушным зазором:  
1 – якорь; 2 – полюс; 3 – торсион; 4 – воздушный зазор

Получение заданного дугового профиля воздушных зазоров с требуемыми величинами зазоров осуществляется путем выполнения поверхности полюсов в виде сектора кругового цилиндра, центр которого находится на внутренней стороне полюса, а радиус определяется уравнением

$$R_1 = \frac{c_{\text{п}}(R_{\text{я}}^2 + \delta_0^2)}{2\delta_0 R_{\text{я}}},$$

где  $R_1$  – радиус закругления полюса;  $c_n$  – длина полюса;  $R_y$  – радиус поворота якоря, равный половине длины якоря  $l_y$ ;  $\delta_0$  – величина воздушного зазора под внешней стороной полюса.

При уточненном расчете такого ЭМП следует с помощью уравнений Максвелла построить картину электромагнитного поля в зазоре и при определении электромагнитного усилия интегрированием вдоль зазора учесть неравномерное распределение индукции.

С целью получения достаточно простой инженерной методики расчета, заменим дуговой воздушный зазор плоским, эквивалентным по величине магнитной проводимости исходному. В этом случае расчет преобразователя может быть выполнен по методике оптимального синтеза, разработанной для ЭМП традиционного исполнения.

Для определения величины плоского зазора, эквивалентного рассматриваемому, представим его дуговой профиль в виде ломаной (рис. 2).

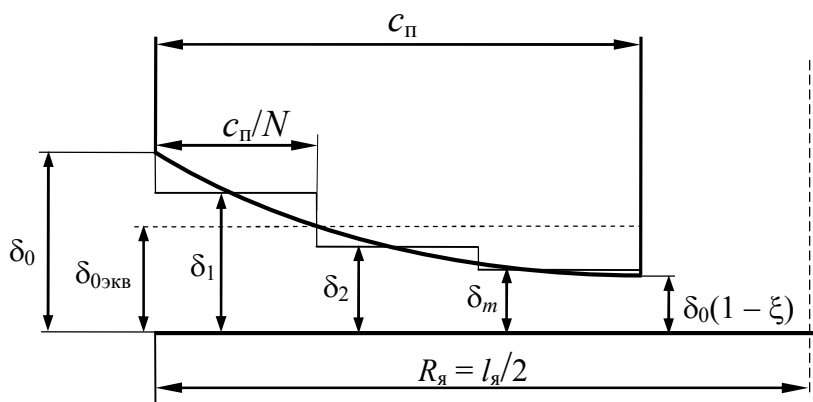


Рис. 2. Аппроксимация дугового профиля воздушного зазора ломаной

Магнитные проводимости зазоров  $G_1, G_2, \dots, G_m$  под отдельными ступеньками определяются выражениями:

$$G_1 = \frac{\mu_0 a_n c_n}{N \delta_1}, \quad G_2 = \frac{\mu_0 a_n c_n}{N \delta_2}, \quad G_m = \frac{\mu_0 a_n c_n}{N \delta_m},$$

где  $N$  – число ступенек ломаной, аппроксимирующей дугу;  $a_n$  – ширина полюса.

В общем случае величина воздушного зазора под  $m$ -й ступенькой равна

$$\delta_m = \delta_0 \left( 1 - \frac{m}{N+1} \xi \right),$$

где  $\xi = \frac{c_n}{R_y}$  – относительная длина полюса;  $m = 1, 2, \dots, N$ .

Магнитные проводимости аппроксимированного дугового зазора и эквивалентного плоского:

$$G = \frac{\mu_0 a_n c_n}{N \delta_0} \sum_{m=1}^N \left( \left[ 1 - \frac{m}{N+1} \xi \right]^{-1} \right); \quad (1)$$

$$G_{0\text{экв}} = \frac{\mu_0 a_n c_n}{\delta_{0\text{экв}}}. \quad (2)$$

Приравняв выражения (1) и (2), найдем величину эквивалентного воздушного зазора

$$\delta_{0\text{экв}} = N\delta_0 \left\{ \sum_{m=1}^N \left( 1 - \frac{m}{N+1} \xi \right)^{-1} \right\}^{-1}. \quad (3)$$

Значительно более высокую резонансную частоту имеет ЭМП с катающимся якорем (рис. 3), у которого воздушный зазор под внутренней стороной полюса выполнен близким к нулю.

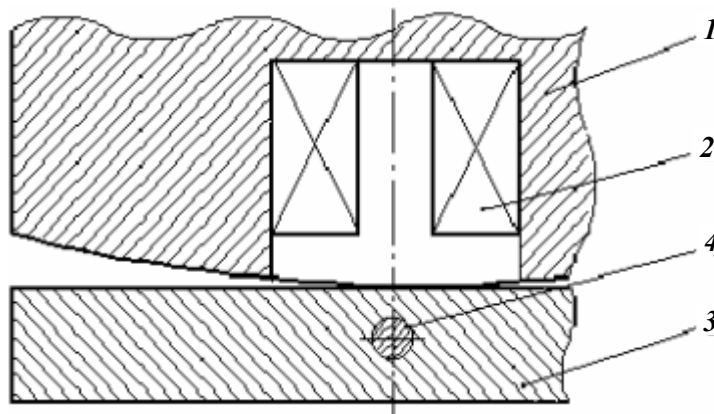


Рис. 3. Фрагмент ЭМП с катающимся якорем:  
1 – магнитопровод; 2 – рабочие обмотки; 3 – якорь; 4 – торсион

Этот ЭМП конструктивно подобен электродвигателю с катящимся ротором в дуговом исполнении [3]. Но в отличие от последнего в воздушном зазоре ЭМП создается не вращающееся магнитное поле, а покоящееся пульсирующее противофазно в радиально противоположных сторонах воздушного зазора.

За счет того, что якорь 3, периодически поворачиваясь (колеблясь) вокруг оси торсиона, прокатывается по поверхности полюсов 1, рабочий воздушный зазор очень мал (0,01...0,05 мм), а значит велико электромагнитное усилие. По предварительным расчетам увеличение пускового электромагнитного момента за счет уменьшения воздушного зазора (при прочих равных условиях) по сравнению с базовым ЭМП будет почти в 20 раз. Собственная частота при этом увеличится в 4,5 раза и превысит 1000 Гц. Хотя проведенные расчеты являются оценочными, так как не учитывают насыщение участков стали в точках соприкосновения полюсов с якорем, но они подтверждают перспективность использования ЭМП с катающимся якорем в высокочастотных электрогидравлических вибраторах.

### Заключение

Выполнение базового ЭМП по предложенной конструктивной схеме дает возможность снизить величину рабочего эквивалентного воздушного зазора до  $\delta_{0\text{экв}} = 0,814 \cdot \delta_0$  от первоначального, что способствует повышению собственной частоты преобразователя почти на 11 %. При расчетах по формуле (3) число ступенек ломаной  $N$ , аппроксимирующей дугу, принимают не более 10, поскольку большее их число к заметному росту точности вычислений не приводит.

Таким образом, новые конструктивные схемы электромагнитных преобразователей – с дуговым воздушным зазором и катающимся якорем – позволяют повысить их быстродействие и тем самым расширить диапазон воспроизводимых частот. При этом повышение быстродействия не требует увеличения мощности источника питания, что очень важно для автономных электрогидравлических виброисточников.

## **Литература**

1. Погуляев, М. Н. Оптимизация электромеханических преобразователей автономных электрогидравлических виброисточников / М. Н. Погуляев, В. И. Луковников // Научные технологии. – 2008. – Т. 9, № 9. – С. 26–29.
2. Гомельский, Ю. С. Электрические элементы электрогидравлических устройств автоматики / Ю. С. Гомельский. – М. : Энергия, 1968. – 144 с.
3. Свечарник, Д. В. Электрические машины непосредственного привода: Безредукторный электропривод / Д. В. Свечарник. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 208 с.

*Получено 22.12.2011 г.*