

УДК 621.527.2

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ АВТОНОМНЫХ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ВИБРАТОРАХ

**М. Н. ПОГУЛЯЕВ**

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

### **Введение**

В настоящее время в сейсморазведке [1], [3], испытательной технике, машиностроении и других отраслях широко применяются электрогидравлические вибраторы (ЭГВ). Конструктивно ЭГВ представляет собой одно- или двухкаскадный гидроусилитель, возбуждаемый электромеханическим преобразователем (ЭМП).

На рис. 1 представлена схема двухкаскадного ЭГВ, применяемого в мобильных источниках сейсмического зондирования Земли. ЭМП 6 служит для преобразования электрического сигнала электронного блока управления в колебательное движение золотника первого каскада 5 гидроусилителя, который управляет работой второго, распределительного каскада 4. Усиленные по мощности и амплитуде колебания через выходной шток 2 силового исполнительного гидроцилиндра 1 подводятся к опорной плите 3. Частота выходных колебаний ЭГВ определяется задающим генератором ЗГ, сигнал с которого через усилитель мощности УМ подается на обмотку управления ЭМП. Для снижения нелинейности частотных характеристик гидровибратора и повышения устойчивости работы с помощью датчика ДП вводится отрицательная обратная связь по скорости или перемещению золотника распределительного каскада.

Основными параметрами ЭГВ являются развиваемое усилие и диапазон воспроизводимых частот. Применяемые сегодня электрогидравлические сейсмические источники типа СВ10-100, СВП10-100, СВ5-150 не отвечают требованиям современной сейсморазведки в основном из-за низкого верхнего предела излучаемых частот – 100...150 Гц [2], [3]. Требованием сегодняшнего дня и ближайшего будущего является увеличение максимальной рабочей частоты вибрационного источника до 300 Гц, т. е. вдвое, что практически реализуется путем повышения быстродействия электромеханического преобразователя, входящего в его состав [2]. Недостаточное быстродействие существующих электромеханических преобразователей сдерживает создание сейсмических комплексов с высокой разрешающей способностью, способных существенно поднять эффективность геологоразведочных работ. Требуются высокочастотные вибраторы и в технике проведения испытаний изделий на вибропрочность и вибростойкость. Таким образом, повышение быстродействия ЭМП является актуальной задачей, решение которой дополнительно усложняется тем, что в автономных электрогидровибраторах полная мощность электронного источника питания ограничена.

**Постановка задачи**

Цель данной работы – провести сравнительный анализ современных ЭМП и оценить перспективу их применения при создании автономных высокочастотных ЭГВ с максимальной рабочей частотой, в два и более раз превышающей существующую.

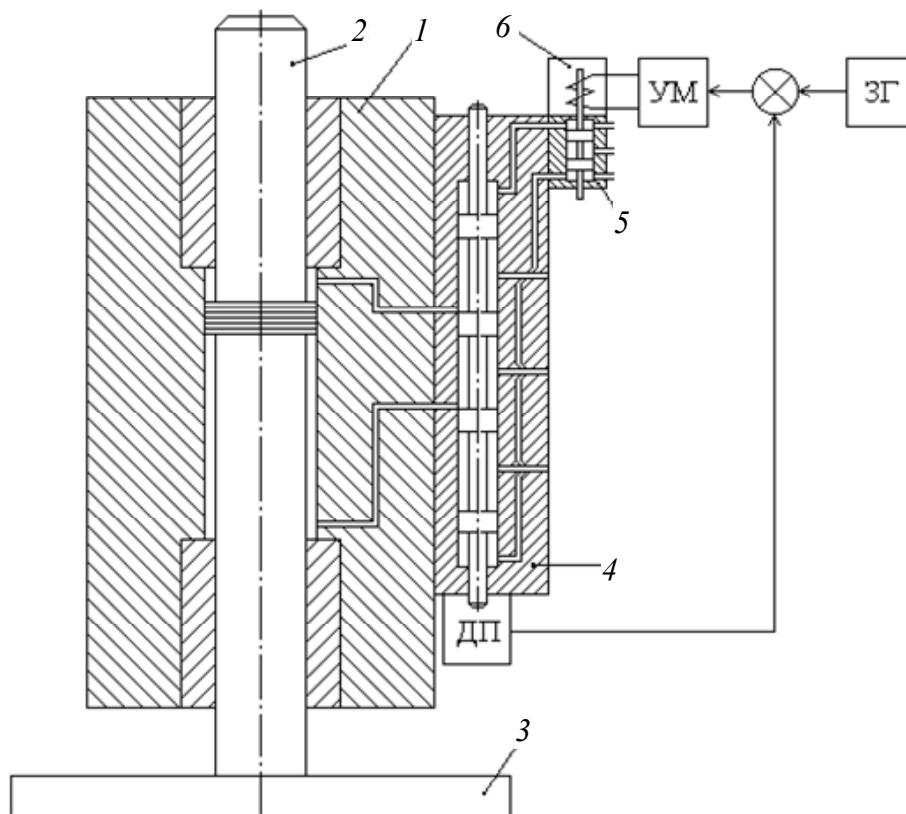


Рис. 1. Схема электрогидравлического вибратора: 1 – силовой гидроцилиндр; 2 – выходной шток; 3 – опорная плита; 4 – распределительный каскад; 5 – управляющий каскад; 6 – электромеханический преобразователь; УМ – усилитель мощности; ЗГ – задающий генератор; ДП – датчик перемещения

В настоящее время для работы в составе электрогидравлических вибраторов применяются преимущественно ЭМП двух типов – электродинамические и электромагнитные [4], [5]. В то же время промышленностью серийно выпускается большое количество электромашинных преобразователей самых различных типов. В связи с этим необходимо также оценить перспективы их применения в качестве вибровозбудителей для ЭГВ.

**Решение задачи**

Для сравнительного анализа необходимо определить (параметры) критерии, по которым можно оценивать быстродействие преобразователей и судить о пригодности конкретного преобразователя для работы в составе высокочастотного автономного ЭГВ. В качестве таких критериев можно использовать общеизвестные показатели быстродействия:

- собственное угловое ускорение  $\varepsilon_0 = M_{\Pi} / J_{\text{як}}$ ;
- собственное линейное ускорение  $a_0 = F_{\Pi} / m_{\text{як}}$ ;
- относительный (удельный) электромагнитный момент

$$M_{os} = M_{\Pi} / S_{\text{потр}};$$

- относительное (удельное) электромагнитное усилие

$$F_{os} = F_{п} / S_{потр};$$

- электромеханические постоянные времени

$$\tau = J_{як} \omega_{як.хх} / M_{п}, \tau' = m_{як} \cdot V_{як.хх} / F_{п},$$

где  $M_{п}$ ,  $F_{п}$  – пусковые электромагнитные момент или усилие, развиваемые ЭМП;  $J_{як}$ ,  $m_{як}$  – момент инерции или масса якоря;  $S_{потр}$  – полная потребляемая мощность;  $\omega_{як.хх}$ ,  $V_{як.хх}$  – угловая или линейная скорость холостого хода якоря.

Однако для ЭМП, являющегося по своей конструкции механическим колебательным звеном, указанные показатели лишь косвенно отражают частотные свойства, которые определяют устойчивость работы ЭГВ на высоких частотах. Поэтому в качестве основного критерия, оценивающего в комплексе и частотные свойства преобразователя и его быстродействие, будем использовать собственную частоту  $f_{рез}$  колебаний нагруженного золотником ЭМП, а общепринятые показатели – в качестве вспомогательных (дополнительных). При этом для исключения режима резонансной неустойчивости ЭГВ собственная частота  $f_{рез}$  нагруженного (с золотником) ЭМП выбирается в 2,5–3,0 раза выше максимальной рабочей частоты вибратора.

Из существующих электрогидравлических вибраторов, применяемых в сейсмо-разведке, максимальную рабочую частоту 150 Гц имеет сейсмоисточник СВ-5-150. Входящий в его состав ЭМП, который в дальнейшем будем считать базовым, в среднем имеет следующие параметры:

- полная потребляемая мощность  $S_{потр} = 42$  ВА;
- амплитуда угловых колебаний не менее  $\alpha_m = 0,191$  град, линейных при радиусе якоря  $R_{як} = 0,03$  м не менее  $x_m = 0,1$  мм;
- пусковое электромагнитное усилие  $F_{п} = 25$  Н (или электромагнитный момент  $M_{п} = 0,75$  Нм);
- собственное угловое ускорение  $\varepsilon_0 = 3,33 \cdot 10^4$  с<sup>-2</sup>;
- относительный электромагнитный момент  $M_{os} = 0,0178$  Нм/ВА;
- собственная частота колебаний якоря нагруженного ЭМП без учета электромагнитной жесткости  $f_{рез} = 375$  Гц.

Для создания высокочастотного сейсмоисточника с максимальной рабочей частотой 300 Гц, потребуется преобразователь, имеющий более высокие значения приведенных выше параметров, а именно, при полной потребляемой мощности не более 42 ВА он должен развивать пусковое усилие не менее 100 Н (или момент не менее 3,0 Нм) с тем, чтобы обеспечить заданную амплитуду колебаний золотника 0,1 мм на верхнем пределе рабочей частоты, собственное угловое ускорение не менее  $1,3 \cdot 10^5$  с<sup>-2</sup>, относительный электромагнитный момент не ниже 0,07 Нм/ВА. При этом его собственная частота должна находиться в пределах  $750 \div 1000$  Гц.

Исходя из принятых критериев быстродействия, был проведен анализ характеристик более 50 отечественных и зарубежных ЭМП различных типов (магнитоэлектрических, электромагнитных, электродинамических, индукционных, пьезоэлектрических и др.), которые могут использоваться для работы в составе автономных высокочастотных ЭГВ. Из них для сравнения были отобраны преобразователи, параметры которых близки или лучше, чем у базового (таблица). В таблице приведены технические характеристики таких ЭМП и рассчитаны численные значения основного и вспомогательных критериев, оценивающих их быстродействие.

Кроме того, для комплексной характеристики ЭМП дополнительно введен обобщенный показатель, равный произведению собственного ускорения, относи-

тельного момента (усилия) и момента или усилия на единицу массы преобразователя, который, хотя и носит вспомогательную роль, но в комплексе характеризует его относительные энергетические, массовые и динамические свойства. Пригодность конкретного ЭМП для работы в составе автономных высокочастотных электрогидровибраторов определялось путем сопоставления его технических параметров с аналогичными требуемыми параметрами быстродействующего преобразователя. Собственные резонансные частоты определены для преобразователей без нагрузки  $f_{0,рез}$  и с нагрузкой  $f_{рез}$  – золотником управляющего каскада гидроусилителя массой 20 грамм.

**Сравнение характеристик быстродействующих ЭМП углового и линейного движения**

Технические параметры	Типы ЭМП													
	Электромагнитные			Двигатели постоянного тока			Электродинамические вибраторы			Шаговые двигатели		С/Д с катящимся ротором	Пьезоэлектрические, Matsushita	ЭМП, наилучший по показателю
	Базовый СКТЬ СТ	103	20-2, 21-2	МИГ-25Б	ДБМ-105	ДП-95-90-6	SD	VEZ-20X	203	ДШИ-360-4-31	HDM-150-2000-8			
$S_{потр}, \text{ВА}$	42	9,0	9,0	38,4	27	135	90	30	60	13,3	30	70	7,8	Пьезоэлектрические
$F_{п}, \text{Н}$	25	35,6	20,4	–	–	–	44	29,5	29,5	–	–	–	–	SD
$M_{п}, \text{Н} \cdot \text{м}$	0,75	0,677	0,336	0,28	1,8	0,8	–	–	–	3,8	1,45	9,81	0,98	ДКР
$m_{як}, 10^{-3}, \text{кг}$	25	6,14	2,2	–	–	–	27	54	20	–	–	–	–	20-2
$J_{як}, 10^{-5}, \text{кг} \cdot \text{м}^2$	2,25	0,074	0,02	0,068	40	0,14	–	–	–	1430	5,0	400	2,5	20-2
$F_{пуск}/S_{потр}, \text{Н/ВА}$	0,595	3,96	2,27	–	–	–	0,48	0,98	0,49	–	–	–	–	103
$M_{пуск}/S_{потр}, \text{Нм/ВА}$	0,0178	0,0752	0,037	0,007	0,067	0,006	–	–	–	0,286	0,048	0,14	0,125	ДШИ
$F_{п}^3/m_{як}mS_{потр}, 10^{-3}, \text{мс}^{-5}$	445,5	2917	2462	–	1,95	–	–	–	–	10,74	–	–	–	103
$M_{п}^3/m_{як}mS_{потр}, 10^{-3}, \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-5}$	20,9	166,5	121	1,243	–	–	–	0,452	1,82	–	1,346	3,74	80	103
$a_0 = F_{п}/m_{як}, 10^3, \text{м} \cdot \text{с}^{-2}$	1,00	5,8	9,27	–	–	–	1,63	0,546	1,47	–	–	–	–	20-2
$\epsilon_0 = M_{п}/J_{як}, 10^4, \text{с}^{-2}$	3,33	91,5	168	41,2	0,45	57	–	–	–	0,088	2,9	0,245	3,92	20-2
$f_{0,рез}, \text{Гц}$	505	2630	3570	1770	185	2080	640	370	610	82	260	136	340	20-2
$f_{рез}, \text{Гц}$	375	520	370	335	180	555	485	360	430	81	210	135	260	ДП-95, 103

**Результаты исследований**

Анализ технических параметров, приведенных в таблице, показывает, что ни один из современных серийно выпускаемых ЭМП полностью не отвечает поставленным требованиям, хотя их некоторые технические показатели выше или близки к ним. Так, например, электродвигатель с полым якорем ДП-95 имеет собственное ус-

корение  $5,7 \cdot 10^5 \text{ с}^{-2}$ , а – с гладким якорем МИГ-25Б –  $4,12 \cdot 10^5 \text{ с}^{-2}$ , что в несколько раз превышает требуемое –  $1,3 \cdot 10^5 \text{ с}^{-2}$ . Еще большие значения собственного ускорения имеют американские преобразователи 20-2 и 103, соответственно  $16,8 \cdot 10^5 \text{ с}^{-2}$  и  $9,15 \cdot 10^5 \text{ с}^{-2}$ .

Пусковой момент больше необходимого 3,0 Нм развивают двигатели, – шаговый ДШИ – 3,8 Нм и с катящимся ротором ДКР – 9,81 Нм. Кроме того, первый имеет и наилучший показатель по относительному моменту – 0,286 Нм/ВА. В то же время ни один из представленных ЭМП не удовлетворяет основному критерию – их собственные частоты оказываются ниже требуемой 750 Гц. Наибольшее значение резонансной частоты – 555 Гц у двигателя постоянного тока ДП-95, но его потребляемая мощность 135 Вт превышает значение максимально допустимой мощности нагрузки для автономного источника питания 42 ВА. В данном случае, чтобы снизить потребляемую мощность необходимо усовершенствование конструкции двигателя. Значительно меньше – 9,0 ВА, потребляет электромагнитный преобразователь 103 и при этом имеет довольно высокое значение  $f_{\text{рез}} = 520 \text{ Гц}$ . Однако для его работы даже на постоянном токе требуется источник питания с рабочим напряжением 76 В, а для нормального функционирования преобразователя во всем диапазоне рабочих частот ЭГВ понадобится еще большее рабочее напряжение, т. е. его непосредственное использование с автономным источником питания, у которого максимальное выходное напряжение 24 В, невозможно.

По сравнению с базовым преобразователем более высокими значениями собственной частоты обладают электродинамические вибраторы SD и 203 – 485 Гц и 430 Гц соответственно, но развиваемые ими усилия 44 Н и 29,5 Н меньше требуемого – 100 Н. Кроме того, для электродинамических вибраторов небольшой мощности остается нерешенной проблема обеспечения надежного крепления обмотки управления с золотником.

Сопоставление табличных данных также показывает, что собственные частоты нагруженного и ненагруженного ЭМП различаются значительно, если момент инерции (масса) якоря намного меньше момента инерции (массы) золотника, например, у преобразователя 20-2 значения частот  $f_{0,\text{рез}}$  и  $f_{\text{рез}}$  различаются в 9 раз. Поэтому, снижение момента инерции якоря, хотя и увеличивает собственное ускорение, но к заметному росту резонансной частоты преобразователя не приводит, так как преобладающей становится инерционность золотника.

### Заключение

Проведенный обзор технических характеристик современных ЭМП и их сравнительный анализ по быстродействию позволяют заключить, что в настоящее время отсутствует преобразователь, удовлетворяющий всем требованиям, предъявляемым со стороны автономного высокочастотного ЭГВ. Обобщая результаты сравнения технических параметров современных быстродействующих ЭМП, удалось выяснить, что для работы в составе автономных высокочастотных ЭГВ целесообразно использовать преобразователи электромагнитного типа, которые являются наилучшими по 9 основным показателям из 13, хотя и они еще требуют повышения своего быстродействия. Не исключается возможность применения отдельных серийных электромашинных ЭМП в качестве быстродействующих при соответствующей доработке их конструкции.

Для более точного определения собственных частот быстродействующих преобразователей необходим учет особенностей их работы на высоких частотах, а именно: увеличение импеданса обмотки управления, действие вихревых токов, электрической упругости, ЭДС движения и др. Разрабатываемые методики расчета и проекти-

рования высокочастотных ЭМП должны учитывать ограниченность источника питания автономного ЭГВ по полной мощности через максимально допустимые значения напряжения и тока на его выходе.

### Литература

1. Каузов, А. А. Применение невзрывных источников возбуждения в структурной сейсморазведке / А. А. Каузов, И. Б. Крылов, В. В. Кузнецов // Проблемы вибрационного просвечивания Земли. – Москва : Наука, 1997. – С. 162–184.
2. Повышение разрешающей способности вибрационной сейсморазведки: Разведочная геофизика / А. Н. Иноземцев [и др.]. – Москва : ВИЭМС, 1998. – 73 с.
3. Эффективные пути поисков, разведки и разработки залежей нефти Беларуси : материалы науч.-практ. конф. (4–6 окт. 2006 г.). – Гомель : РУП «Производственное объединение «Белоруснефть», 2007. – 770 с.
4. Невзрывные источники сейсмических колебаний. Справочник / под ред. М. Б. Шнеерсона. – Москва : Недра, 1992. – 452 с.
5. Гомельский, Ю. С. Электрические элементы электрогидравлических устройств автоматики / Ю. С. Гомельский. – Москва : Энергия, 1978. – 144 с.

*Получено 03.11.2008 г.*