

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ АВТОНОМНЫХ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ВИБРОИСТОЧНИКОВ

М.Н. Погуляев, В.И. Луковников

Определены основные требования к электромеханическим преобразователям (ЭМП), работающих в составе высокочастотных автономных электрогидравлических вибраторов. Указано на необходимость оптимизационного подхода к синтезу таких ЭМП. Приведены уравнения целевой функции и ограничений, положенные в основу методики оптимального проектирования электромагнитных мостовых преобразователей с поляризацией. Представлены результаты оптимизации конструктивных параметров преобразователей, используемых в сейсмокомплексах типа СВ и СВП.

В настоящее время при проведении геологоразведочных работ наиболее широко используется метод сейсмического зондирования Земли [1], реализуемый применением мобильных вибросейсмических комплексов типов СВ и СВП, состоящих из электрогидравлических вибрационных источников (ЭГВИ) сейсмических сигналов, группы регистрирующих сейсмоприемников и цифровой сеймостанции, обеспечивающей запись и предварительную обработку сейсмограмм. Максимальная рабочая частота ЭГВИ данных комплексов не превышает 150...160 Гц, что позволяет разрешать на сейсмограмме границы пластов, отстоящих друг от друга на расстоянии 50...100 м. Задачами сегодняшнего дня и ближайшего будущего являются расстояния в 10...20 м, что можно достичь при увеличении верхнего предела рабочей частоты вибрационного источника до 300...320 Гц путем повышения быстродействия входящего в его состав электромеханического преобразователя (ЭМП), связывающего электрическую и гидравлическую части вибратора [2]. В виброисточнике применен ЭМП электромагнитного типа [3], который в дальнейшем будем считать базовым. Выполнен он по мостовой схеме с поляризацией от постоянных магнитов (рис.1). Схемы замещения электрической, механической и магнитной цепей преобразователя представлены на рис.2.

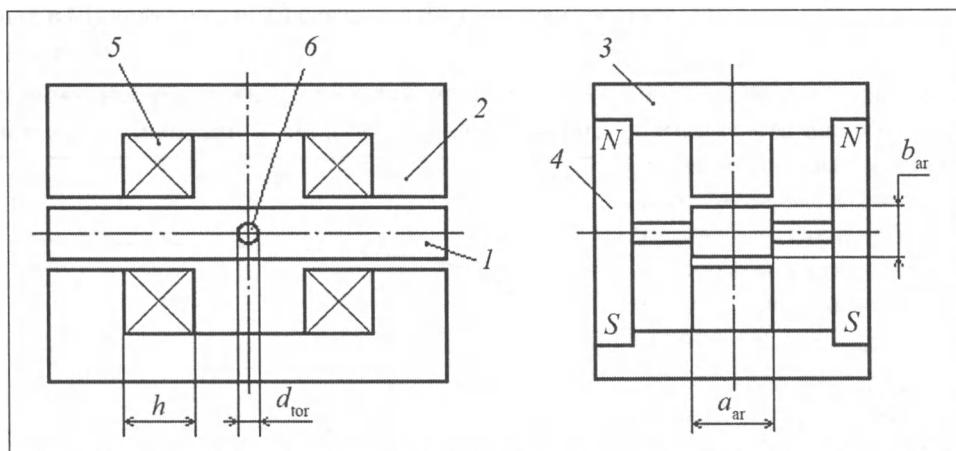


Рис. 1. Конструкция электромагнитного мостового преобразователя с поляризацией: 1 – якорь, 2 – полюса, 3 – основание магнитопровода, 4 – постоянные магниты, 5 – обмотки управления, 6 – торсион

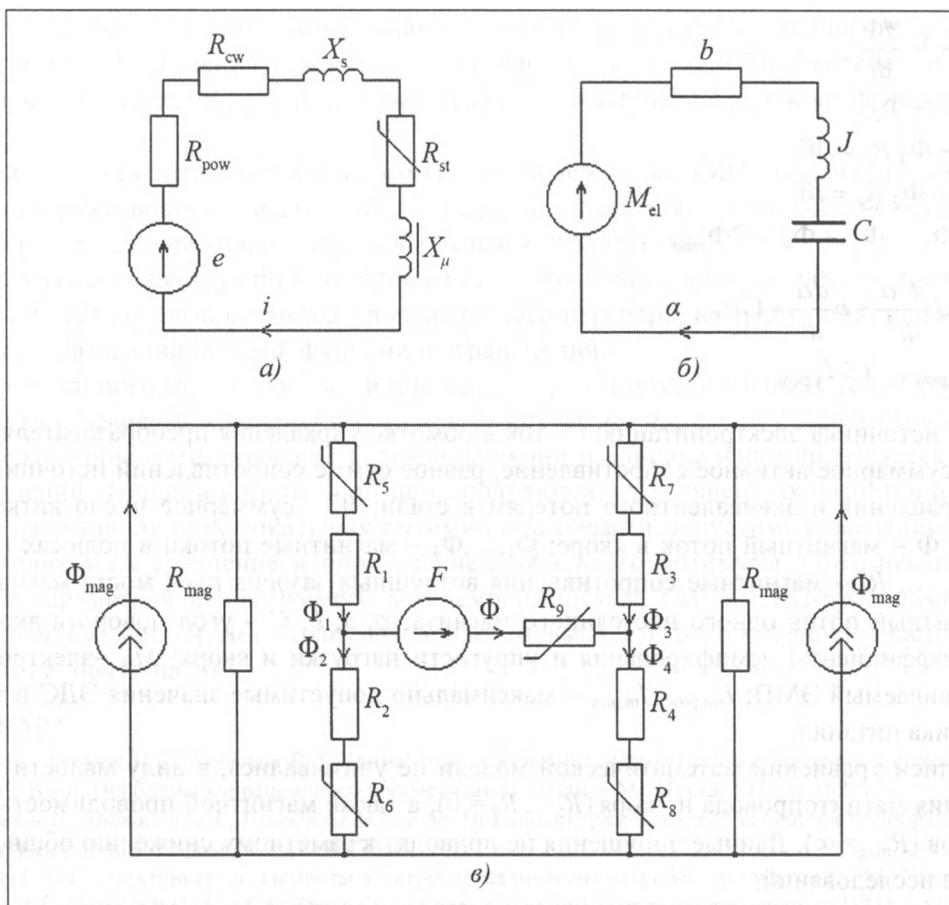


Рис. 2. Схемы замещения электрической (а), механической (б) и магнитной (в) цепей преобразователя

Для стабильной и устойчивой работы электрогидравлической системы необходимо, чтобы резонансная (собственная) частота f_0 нагруженного ЭМП примерно в 2,5–3,0 раза превышала требуемую верхнюю частоту виброисточника. Это означает, что для создания ЭГВИ с верхним пределом рабочей частоты в 300 Гц потребуется ЭМП с резонансной частотой не менее 750 Гц, что почти вдвое превышает собственную частоту базового ЭМП. Кроме того, для нормальной работы гидравлической части вибратора ЭМП должен обеспечить в рабочем диапазоне частот достаточную амплитуду колебаний золотника первого каскада $x_{m,des}$. При этом следует также учитывать, что при работе на повышенных частотах существенное влияние на характеристики ЭМП оказывают электромагнитная жесткость и ЭДС движения, потери на гистерезис и вихревые токи.

Решение данной задачи усложняется и тем, что в автономных электрогидровибраторах подвижных сейсморазведочных комплексов максимальное значение полной мощности электронного источника $S_{m,pow}$, питающего ЭМП, ограничена.

Для преобразователей современных высокочастотных автономных ЭГВИ параметры $x_{m,des}$ и f_0 могут достигают значений: $x_{m,des} \geq 0,1$ мм, $f_0 = 800 \dots 1000$ Гц при $S_{m,pow} \leq 100$ ВА. Достижение этих, почти предельных величин, невозможно без оптимизационного подхода к проектированию подобных ЭМП.

Для проведения аналитических исследований ЭМП, работающих в составе автономных электрогидравлических вибраторов, по схемам замещения (см. рис.2) разработана уточненная математическая модель базового преобразователя (1), учитывающая значение полной мощности источника на уровне $E_{m,pow} I_{m,pow}$, потери на гистерезис и вихревые токи через активное сопротивление R_{st} , входящее в состав суммарного сопротивления, влияние ЭДС движения через магнитный поток Φ :

$$\begin{cases} e = iR + W \frac{d\Phi}{dt} \\ \Phi = \Phi_1 - \Phi_2 \\ \Phi_1 R_1 - \Phi_3 R_3 = iW \\ \Phi_4 R_4 - \Phi_2 R_2 = iW \\ \Phi_1 + \Phi_3 = \Phi_2 + \Phi_4 = 2\Phi_{\text{mag}} \\ M_{\text{el}} = J \frac{d^2\alpha}{dt^2} + b \frac{d\alpha}{dt} + C\alpha, \\ e \leq E_{\text{т.пов}}, \quad i \leq I_{\text{т.пов}}, \end{cases} \quad (1)$$

где e – ЭДС источника электропитания; i – ток в обмотке управления преобразователя; $R = R_{\text{пов}} + R_{\text{св}} + R_{\text{ст}}$ – суммарное активное сопротивление, равное сумме сопротивлений источника питания, обмотки управления и эквивалентного потерям в стали; W – суммарное число витков обмотки управления; Φ – магнитный поток в якоре; Φ_1, \dots, Φ_4 – магнитные потоки в полюсах (воздушных зазорах); R_1, \dots, R_4 – магнитные сопротивления воздушных зазоров плеч моста магнитопровода; Φ_{mag} – магнитный поток одного постоянного магнита; α, J, b, C – угол поворота якоря, момент инерции, коэффициенты демпфирования и упругости нагрузки и якоря; M_{el} – электромагнитный момент, развиваемый ЭМП; $E_{\text{м.пов}}, I_{\text{м.пов}}$ – максимально допустимые значения ЭДС и тока на выходе источника питания.

При записи уравнений математической модели не учитывались, в виду малости, магнитные сопротивления магнитопровода и якоря ($R_5 \dots R_9 = 0$), а также магнитной проводимостью постоянных магнитов ($R_{\text{mag}} = \infty$). Данные допущения не приводят к заметному снижению общности проводимых далее исследований.

Преобразование модели (1) и вывод необходимых расчетных соотношений выполнены операторным методом и методом гармонического баланса, с последующей проверкой и анализом полученных уравнений на ПЭВМ.

Для проведения синтеза ЭМП, оптимального по быстродействию при заданной полной мощности автономного источника, разработано математическое обеспечение, основу которого составляют уравнение целевой функции (2), связывающее собственную частоту с массогабаритными параметрами преобразователя, и уравнения ограничений (3):

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \left\{ 3\pi g(1 + k_{\text{hyd}}) d_{\text{тор}}^4 \left[16h \left[12m_{\text{sl}} n_{\text{тор}} h d_{\text{тор}} + 2\gamma_{\text{ар}} a_{\text{тор}} (3n_{\text{тор}}^2 + k_1^2) h d_{\text{тор}} + 12\gamma_{\text{ар}} a_{\text{тор}} n_{\text{тор}} h^2 d_{\text{тор}}^3 + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + 3m_{\text{sl}} n_{\text{тор}}^2 d_{\text{тор}}^2 + 8\gamma_{\text{ар}} a_{\text{тор}} h^3 d_{\text{тор}}^2 + 12m_{\text{sl}} h^2 + \gamma_{\text{ар}} a_{\text{тор}} n_{\text{тор}} (n_{\text{тор}}^2 + k_1^2) d_{\text{тор}}^5 \right] \right\}^{-1} \left. \right\}^{-0,5}, \quad (2)$$

где $\gamma_{\text{ар}}$ – удельная масса материала якоря; g – модуль упругости материала торсиона; $h, d_{\text{тор}}$ – размер окна катушки управления и диаметр торсиона; k_1, k_{hyd} – коэффициенты запаса по креплению торсиона в якоре и гидродинамической жёсткости; m_{sl} – суммарная масса тяги и золотника; $a_{\text{тор}}, n_{\text{тор}}$ – расчётные коэффициенты, зависящие от отношения поперечных сечений полюса и якоря, коэффициента запаса k_1 и относительной ширины якоря $a_0 = a_{\text{ар}} / b_{\text{ар}}$.

Уравнения ограничений получены на основе требований, предъявляемых к ЭМП со стороны автономного ЭГВИ, и условия ненасыщения якоря рабочим магнитным потоком:

$$\begin{cases} I_{\text{м}} \leq I_{\text{м.пов}}, \\ x_{\text{м}} \geq x_{\text{м.дес}}, \\ B_{\text{м}} \leq k_s B_s, \end{cases} \quad (3)$$

где $x_{m,des}$ – требуемое по техническому заданию величина амплитуды линейных колебаний якоря; I_m, x_m, B_m – расчетные значения амплитуды потребляемого тока, линейных колебаний якоря и магнитной индукции в якоре; B_s, k_s – индукция насыщения материала якоря и коэффициент запаса по насыщению.

Решение задачи синтеза оптимального по быстродействию ЭМП заключается в определении значений конструктивных параметров d_{tor}, h и a_0 , при которых значение собственную частоты по (2) максимально и одновременно выполнены условия ограничений (3).

После анализа существующих методов решения подобных задач [4] для поиска оптимума целевой функции (2) был выбран метод упорядоченного перебора, не требующий сложных математических преобразований целевой функции и ограничений.

● Суть данного метода состоит в последовательном обходе узловых точек n -мерного пространства независимых переменных (в нашем случае это d_{tor}, h и a_0). При этом в каждой узловой точке вычисляется значение целевой функции и одновременно проверяется выполнение ограничений. Точки, в которых они не выполняются, из дальнейших расчетов исключаются. После нахождения всех локальных оптимумов в области допустимых значений переменных производится их сравнение и определение глобального оптимума. Оптимизация конструктивных параметров используемого в сейсмокомплексах СВ- и СВП-преобразователя с использованием данной методики, позволила повысить его собственную частоту с 375 до 611 Гц, т.е. почти на 60%.

□ Литература

1. Каузов А.А., Крылов И.Б., Кузнецов В.В. Применение невзрывных источников возбуждения в структурной сейсморазведке // В кн.: Проблемы вибрационного просвечивания Земли. – М.: Наука, 1977, с. 162–184.
2. Иноземцев А.Н., Потапов О.А., Шнеерсон М.Б. и др. Повышение разрешающей способности вибрационной сейсморазведки: Разведочная геофизика. – М.: ВИЭМС, 1987.
3. Гомельский Ю.С. Электрические элементы электрогидравлических устройств автоматики. – М.: Энергия, 1968.
4. Аветисян Д.А., Соколов В.С., Хан В.Х. Оптимальное проектирование электрических машин на ЭВМ. – М.: Энергия, 1976.

Поступила 16 июля 2008 г.

OPTIMIZATION OF ELECTROMECHANICAL CONVERTERS INDEPENDENT ELECTROHYDRAULIC VIBROSOURCE

M.N. Pahuliayeu, V.I. Lukovnikov

The basic requirements to electromechanical converters (EMC), working in structure of high-frequency independent electrohydraulic vibrators are certain. It is underlined the necessity of optimal approach to synthesis such EMC. The equations of criterion function and the restrictions, which are a basis of the techniques of optimum designing of electromagnetic bridge converters with polarization are resulted. Results of optimization of design data of the converters used in seismic complex of type СВ and СВП are presented.