

ВЫБОР ТИПА И ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛИНЕЙНОГО ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ НЕВЗРЫВНЫХ СЕЙСМОИСТОЧНИКОВ

Бару Ю.А., к.т.н., Мельник А.К., Ткаченко С.В.
Открытое акционерное общество завод "Потенциал"
Украина, 61106, Харьков, ул. Индустриальная, 17
тел. (0572) 99-81-88; E-mail: potencial@potencial.kharkov.com

Милых В.И., д.т.н.
Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Электрические машины"
тел. (0572) 707-65-14; E-mail: mvikpi@kpi.kharkov.ua; сайт: <http://users.kpi.kharkov.ua/kem/>

Стаття присвячена основним питанням теорії і проектування лінійних імпульсних електродинамічних двигунів для невибухових сейсмоджерел. Визначені критерії використання електродинамічних та електромагнітних лінійних імпульсних електродвигунів в невибухових сейсмоджерелах в залежності від параметрів силового імпульсу. Встановлена оптимальна тривалість імпульсу силової дії.

Излагаются основные вопросы теории и проектирования линейных импульсных электродинамических двигателей для невзрывных сейсмоисточников. Определены критерии применения электродинамических и электромагнитных линейных импульсных электродвигателей в невзрывных сейсмоисточниках в зависимости от параметров силового импульса. Установлена оптимальная длительность импульса силового воздействия.

ВВЕДЕНИЕ

"Естественный отбор", произошедший за последние 10...15 лет в области невзрывных импульсных сейсмоисточников, оставил в эксплуатации лишь электромеханические возбудители упругих колебаний. Это закономерно, т.к. только электрическая энергия способна обеспечить точность воспроизведения оптимальных параметров возбуждения.

При выборе параметров импульсных сейсмоисточников существует много спорных и не устоявшихся понятий. Этот вопрос подвергался анализу еще при создании первых невзрывных установок [1]. Активно это обсуждение происходило в 1980-х годах при подготовке так и не утвержденного ГОСТа на невзрывные сейсмоисточники. Принятое тогда решение [2] об оценке газодинамических источников по величине энергии, а электромеханических – по величине импульса силы было компромиссным, но оно не способствовало единству взглядов, как самих разработчиков сейсмоисточников, так и их взаимопониманию с геофизиками, использующими такую технику. Поэтому обсуждение вопроса о выборе параметров сейсмических возбудителей является весьма актуальным.

В соответствии с изложенным, целью данной работы является представление функционально предопределенных основ, на которые необходимо ориентироваться при создании сейсмоисточников, и проведение сравнительного анализа наиболее предпочтительных электромеханических возбудителей упругих колебаний.

ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЕКТНЫХ ПАРАМЕТРОВ СЕЙСМОИСТОЧНИКОВ

При анализе работы линейного импульсного электродвигателя (ЛИЭД) – электромеханического излучателя, являющегося рабочим органом сейсмоисточника, – процесс энергопреобразования должен

рассматриваться совместно с нагрузкой. Нагрузкой является грунт, в котором происходит преобразование импульсного силового возбуждения в энергию упругой деформации, т.е. энергию сейсмических волн.

В многочисленных работах показано, что грунт обладает инерционными и упруго-вязкими свойствами. Инерционные свойства определяются суммой "присоединенной" массы грунта, массы опорной плиты и массы якоря ЛИЭДа. "Присоединенная" масса грунта играет преобладающую роль. Ее величина зависит от опорной плиты [3], размер которой для исключения пластических деформаций грунта должен выбираться так, чтобы удельное давление не превышало значения 0,4...0,7 МПа. Таким образом, инерционные свойства грунта, участвующего в процессе возбуждения сейсмических волн, определяются максимальным усилием, развиваемым сейсмоисточником.

В соответствии с первой системой электромеханических аналогий [4], механическая система, обладающая инерционными и упруго-вязкими свойствами, эквивалентна электрической системе, состоящей из последовательно соединенных катушки индуктивности, конденсатора и резистора. Такой электрический контур является резонансной колебательной системой, которая способна преобразовывать энергию импульсного возбуждения в энергию свободных колебаний. Показано [5], что при импульсном возбуждении амплитуда свободных колебаний в электрическом контуре определяется величиной произведения $U \cdot t_i$, где U – напряжение электрического импульса, t_i – его длительность. В случае механической системы (электромеханический излучатель, установленный на грунт) это эквивалентно тому, что амплитуда возбуждаемых упругих колебаний определяется импульсом силы, развиваемым излучателем, $S = F \cdot t_i$, где F – величина силы воздействия, t_i – ее длительность.

При \sin^2 -й форме возбуждаемого импульса силового воздействия, что характерно для ЛИЭДа, питаемого от конденсаторного накопителя, импульс силы составляет:

$$S = \int_0^{t_i} F_{\max} \sin^2 \omega t dt = \frac{1}{2} F_{\max} t_i = F_{\text{ср}} t_i \quad (1)$$

Вывод о том, что амплитуда регистрируемых сейсмических колебаний пропорциональна импульсу силы, был сделан и в работе [6] путем анализа процесса возбуждения с учетом частотного спектра полезных сейсмических колебаний.

Изготавливаемые в 80-90 годах Опытным заводом "Потенциал", г. Харьков (теперь ОАО завод "Потенциал") источники типа "Сейсмодин" проектировались исходя из того, что их сейсмическая эффективность определяется импульсом силы. Импульс силы характеризует как сейсмическую эффективность источника, так и его массогабаритные параметры и, следовательно, определяет выбор транспортной базы для монтажа установки.

Имея заданную при проектировании величину импульса силы, нельзя произвольно выбрать длительность силового воздействия. В грунте происходит не только формирование сейсмических волн, но и последующая их фильтрация, причем каждый слой грунта, обладая своими физико-механическими свойствами, производит фильтрацию в своем диапазоне частот. Поэтому амплитудно-частотные спектры регистрируемых на поверхности отраженных волн являются усредненными, характеризующими фильтрующие свойства всей исследуемой толщи земли.

Существенным является то, что диапазоны регистрируемых частот отраженных волн при работе различных источников, как импульсных, так и вибрационных, работающих в разных районах, мало отличаются один от другого. Они, как правило, имеют резонансный характер с максимумом в полосе частот 25...35 Гц [2]. Это свидетельствует о том, что частотный спектр регистрируемых колебаний формируется не столько при возбуждении сейсмических волн в области "опорная плита – грунт", сколько при их фильтрации во время прохождения толщи земли.

Воздействовать на изменение диапазона регистрируемых частот при невзрывном возбуждении практически невозможно. Влияние диаметра опорной плиты и, следовательно, величины присоединенной массы земли на частоту генерируемых колебаний [7] существует лишь при возбуждении сейсмических волн, а при последующей фильтрации это влияние становится несущественным.

Однако, выбрав оптимальную длительность силового импульса сейсмоисточника, можно обеспечить наиболее эффективное энергопреобразование при импульсном возбуждении, увеличив тем самым амплитуду сейсмических колебаний в диапазоне полезных частот. Действительно, при импульсном возбуждении колебательного контура максимальная величина амплитуды колебаний будет тогда, когда длительность импульса равняется половине периода свободного колебания [5]. Значит, чтобы с максимальной эффек-

тивностью возбудить колебания в диапазоне частот, соответствующем максимуму АЧХ регистрируемых сигналов, длительность силового воздействия должна находиться в пределах 14...20 мс, что соответствует вышеуказанным частотам 25...35 Гц.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ТИПОВ ЛИЭД КАК СЕЙСМОИСТОЧНИКОВ

Длительность силового импульса определяется индуктивными параметрами ЛИЭД и емкостью конденсаторного накопителя. Варианты типов ЛИЭД могут быть весьма разнообразными [8-11]. Выбор типа ЛИЭД в зависимости от длительности силового воздействия является основным вопросом при проектировании электромеханических источников (ЭМИС).

По принципу действия ЛИЭД современных импульсных сейсмоисточников можно разделить на электромагнитные и электродинамические. На рис. 1 и рис. 2 показаны магнитные системы таких двигателей, применяемых в сейсмоисточниках, изготавливаемых ОАО завод "Потенциал".

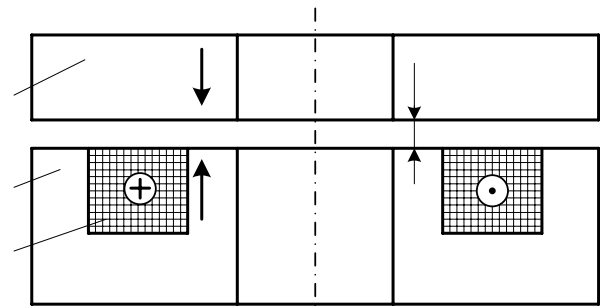


Рис. 1. Магнитная система электромагнитного линейного импульсного электродвигателя

Основой электромагнитного ЛИЭД (рис. 1) является круглый магнитопровод 1 с кольцевой обмоткой 2 статора (индуктора) [12]. От индуктора отделен зазором δ якорь 3 и он испытывает силовое взаимодействие F через возбуждаемое магнитное поле.

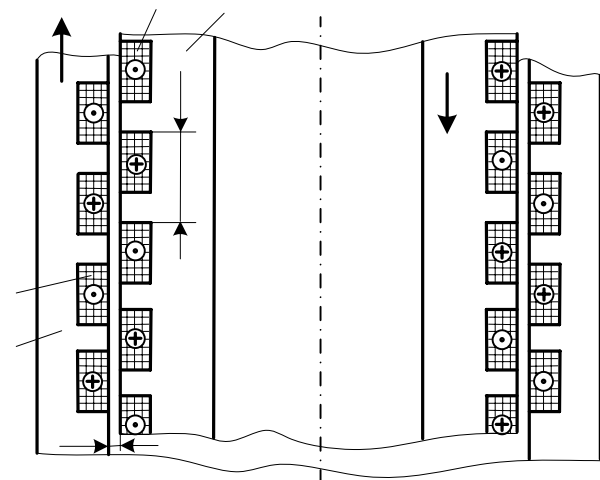


Рис. 2. Магнитная система электродинамического линейного импульсного электродвигателя

Основой электродинамического ЛИЭД (рис. 2) является цилиндрический магнитопровод из сердечников статора 1 и якоря 3. Они разделены зазором δ и имеют системы чередующихся полюсов с полюсным шагом τ , образуемых токами обмоток 2 и 4. Последние расположены в кольцевых пазах, выполненных на обращенных друг к другу концентрических поверхностях сердечников [13, 14, 15]. Направление сил F , действующих на индуктор и статор, соответствуют указанным направлениям токов в обмотках.

ЭМИС является мобильным устройством, размещаемым на транспортной базе с ограниченной грузоподъемностью, поэтому при проектировании критериями выбора типа ЛИЭД являются, прежде всего, весовые характеристики оборудования источника, определяемые в основном массой конденсаторного накопителя и массой ЛИЭД. Масса остальных узлов ЭМИС: механизм подъема и фиксации излучателя с гидравлической системой, кузов, система управления – практически не зависят от принципа действия ЛИЭД.

Масса конденсаторного накопителя $G_{\text{конд}}$ определяется суммой электрической энергии, необходимой для преобразования в механическую, и изменением энергии, запасенной в магнитном поле ЛИЭД. Основная часть запасаемой магнитной энергии приходится на область воздушного зазора. Воздушный зазор в электромагнитном ЛИЭД относительно весьма мал по сравнению с воздушным зазором в электродинамическом ЛИЭД. Поэтому в магнитном поле первого ЛИЭД запасается меньшая энергия. Это обеспечивает высокую эффективность преобразования энергии в электромагнитном ЛИЭД и соответственно меньшие емкость и массу конденсаторного накопителя.

Однако сохранение при работе малой величины воздушного зазора требует для нормального функционирования ЛИЭД значительной массы инертного пригруза $G_{\text{пр}}$, которая, хоть и является только частью общей массы ЛИЭДа, характеризует весовые характеристики всего двигателя. Исходя из этих соображений, в качестве показателя, характеризующего весовые параметры ЭМИС, целесообразно принять сумму масс конденсаторного накопителя и инертного пригруза ЛИЭД - $G_{\text{пр}} + G_{\text{конд}}$.

Сравнение двух типов ЛИЭД проводилось на основе методик расчета ЭМИС, разработанных при создании электродинамических источников "Сейсмодин" и электромагнитных "Терра" и "Террадин" и обеспечивающих, как показала многолетняя практика, достаточно высокую точность при проектировании.

Результаты сравнительного анализа приведены на рис. 3 и рис. 4. Сравнение проводилось в диапазоне амплитуд импульсов силового воздействия $F_{\text{max}} = 1...30$ тс.

На рис. 3 видно, что при длительности силового воздействия 5 мс до усилий $F_{\text{max}} = 16...17$ тс электромагнитный ЭМИС имеет меньшие массы, чем электродинамический, причем разница тем больше, чем меньше усилие. При усилиях $F_{\text{max}} > (16...17)$ тс элек-

тродинамический ЭМИС предпочтительнее. Уже при $F_{\text{max}} = 30$ тс сумма масс конденсаторного накопителя и инертного пригруза для электромагнитного ЭМИС на 30% выше, чем у электродинамического. Исходя из этого, в источниках типа "Терра" с максимальной силой $F_{\text{max}} = 0,3 \div 3,0$ тс и длительностью импульса $t_i = 5$ мс, предназначенных для исследования малых и средних глубин геологического разреза, применены электромагнитные ЛИЭДы.

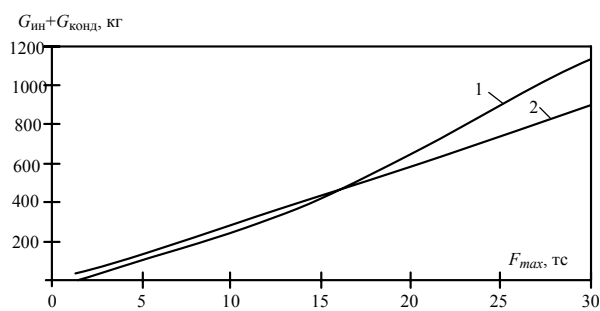


Рис. 3. Зависимость весовых показателей ЛИЭД от обеспечиваемой максимальной силы при $t_i = 5$ мс: 1 – электромагнитный; 2 – электродинамический

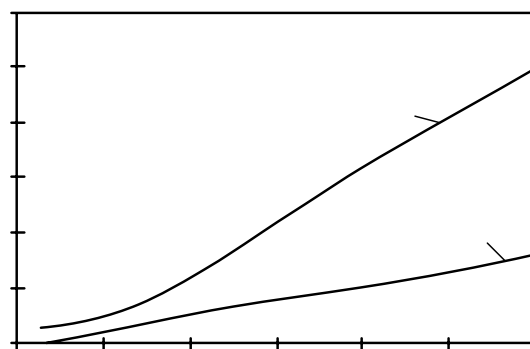


Рис. 4. Зависимость весовых показателей ЛИЭД от обеспечиваемой максимальной силы при $t_i = 15$ мс: 1 – электромагнитный; 2 – электродинамический

Иная картина при длительности импульса 15 мс (рис. 4). Преимущество электродинамического ЛИЭД в сравнении с электромагнитным существует при любом развиваемом усилии и резко возрастает с его увеличением, т.е. для возбуждения импульса силы длительностью 15 мс целесообразно использовать электродинамический ЛИЭД во всем диапазоне усилий. Физически это вполне объяснимо, так как при большой длительности силового воздействия для функционирования электромагнитного ЛИЭД необходимо существенно увеличивать инертный пригруз или воздушный зазор, а значит, и величину запасаемой электрической энергии, т.е. массу конденсаторного накопителя.

Необходимо учесть, что в силу принятых выше условных допущений и унификации исходных данных (напряжения заряда конденсатора, размеров воздушного зазора и полюсного деления), полученные результаты носят оценочный характер. Точные результаты, особенно в диапазоне 15-18 тс при длитель-

ности импульса 5 мс, могут быть получены при проектировании конкретных ЭМИС.

Преимуществом электродинамического ЛИЭД является и то, что исключается эксплуатационный недостаток электромагнитного, заключающийся в возможности соударения индуктора и якоря при изменяющейся упругости поверхностного слоя почвы в различных точках силового воздействия.

При выборе ЛИЭД необходимо учесть и то, что его диаметр на обычном транспортном средстве (автомобили "Урал", "КамАЗ", "КрАЗ") не может превышать 700÷750 мм, и этим ограничивается усилие одной секции электромагнитного (рис. 1) или однокашечного электродинамического ЛИЭДа.

Кратное увеличение усилия в электродинамическом ЛИЭДе возможно путем выбора магнитной системы с необходимым числом полюсов. А в электромагнитном ЛИЭДе требуется расположение секций друг над другом ("этажерка"), но таким образом, чтобы их магнитные поля не были связаны между собой, что конструктивно достаточно сложно и менее эффективно с точки зрения массогабаритных параметров ЛИЭДа.

Электродинамические ЛИЭДы использованы в сейсмоисточниках типов "Сейсмодин С4800/12" ($F_{\max} = 80$ тс, $t_i = 12$ мс) и "Сейсмодин С7200/15" ($F_{\max} = 96$ тс, $t_i = 15$ мс). Эти источники прошли достаточную апробацию в эксплуатации и подтвердили достоверность принципов выбора их параметров и проектирования.

ВЫВОДЫ

1. Основным параметром, характеризующим сейсмическую эффективность импульсного сейсмоисточника, является развиваемый им импульс силы.

2. Оптимальная длительность возбуждения (импульса силового воздействия) определяется максимумом амплитудно-частотной характеристики регистрируемых колебаний грунта и находится в пределах 14...20 мс.

3. Применение электромагнитного ЛИЭД при длительности воздействия 5 мс целесообразно до амплитуды силового импульса 16...17 тс.

4. В импульсных сейсмоисточниках, предназначенных для создания силового воздействия с длительностью 15 мс и более, целесообразно применение электродинамических ЛИЭД, независимо от амплитуды силового импульса.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Райхер Л.Д. . К вопросу о выборе оптимальных параметров импульсных излучателей колебаний электродинамического типа. Реферативный сборник "Вопросы методики и техники геофизических исследований", вып.2. Сер.: Региональная, разведочная и промысловая геофизика, №21, М, 1970.
- [2] Невзрывные источники сейсмических колебаний. Справочник. М., "Недра", 1992.
- [3] Шнеерсон М.Б., Майоров В.В. Наземная сейсморазведка с невзрывными источниками колебаний. М., "Недра", 1980.

- [4] Гамбурцев Г.А. Основы сейсморазведки. М., Гостоптехиздат, 1959.
- [5] Гоноровский И.С. Основы радиотехники. М., Связьиздат, 1957.
- [6] Роман В.И., Геккер С.М., Гонтовой И.З., Ищенко И.П., Каневский В.Ф. Влияние длительности воздействия на сейсмическую эффективность импульсных электродинамических источников упругих колебаний. Материалы Всесоюзной конф. "Вибросейсмические методы исследования земли". Новосибирск, 1982.
- [7] М.Б. Шнеерсон. К вопросу о возможности управления частотой возбуждаемых колебаний в наземной невзрывной сейсморазведке. "Приборы и системы разведочной геофизики", 01/2003.
- [8] Ямпольский Ю.Г. Анализ основных типов силовых линейных импульсных электрических двигателей // Электротехника.-1992.-№8-9.-С. 4-11.
- [9] Мильх В.И. Исследование импульсного режима возбуждения линейного электродвигателя // Электротехника.- 1994.- №10.-С. 3-9.
- [10] Мильх В.И. Исследование тиристорной системы коммутации в линейном двигателе постоянного тока // Электричество.-1995.-№6.-С. 33-41.
- [11] Болюх В.Ф., Данько В.Г. Лінійні електромеханічні перетворювачі імпульсної дії.- Монографія.- Харків: НТУ "ХПИ".-2006.-260 с.
- [12] Деклараційний патент на корисну модель №1748, 7G01V1/04 "Пристрій для збудження сейсмічних коливань» (Ю.А.Бару, Г.С.Водаков, И.Т.Зайцев, А.К.Мельник, В.П.Ткаченко) №2002086853. Пріоритет 20.08.2002. Опубліковано 15.04.2003. Бюллетень №4.
- [13] Авторское свидетельство №674532 G01V1/04 "Активный узел электродинамического источника сейсмических колебаний" (Н.В. Волошин, Ю.А. Бару, А.И. Макогон) №2431014/18-25. Заявлено 20.12.76. Не публиковалось.
- [14] Бару Ю.А., Мельник А.К., Ткаченко В.П., Ткаченко С.В., Фатенко А.Ю., Осташевский Н.А. Линейные импульсные электродинамические двигатели для невзрывных источников сейсмических колебаний // Вестник НТУ "ХПИ". Сборник научных трудов. Тематический выпуск. Электроэнергетика и преобразовательная техника.- Харьков: НТУ "ХПИ". - 2006. - №38.- С. 83-92.
- [15] Бару Ю.А., Мельник А.К., Ткаченко В.П., Ткаченко С.В., Фатенко А.Ю., Осташевский Н.А. "Машинная постоянная" линейного импульсного электродинамического двигателя для невзрывного источника сейсмических колебаний. // Вестник НТУ "ХПИ". Сборник научных трудов. Тематический выпуск. Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов. - Харьков: НТУ "ХПИ".- 2007.- №24.- С. 5-10.

Поступила 05.11.2007