

ГОРНОЕ МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.313

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ИЗЛУЧАТЕЛЯ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИСТОЧНИКА СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

В. В. Ивашин, В. П. Певчев

*Тольяттинский государственный университет,
E-mail: V.Pevchev@tltsu.ru, ул. Белорусская, 14, 445020, г. Тольятти, Россия*

При сейсмическом методе невзрывной технологии разведки нефтяных и газовых месторождений применяются импульсные электромагнитные источники сейсмических сигналов. Для повышения эффективности технологии предлагается обновление системы контроля сейсмоисточников, чтобы получать данные для коррекции режима его работы. В качестве контролируемого параметра выбрано абсолютное перемещение излучателя сейсмоисточника. Его определение построено на основе установления перемещения якоря относительно индуктора электромагнитного двигателя. В импульсном сейсмоисточнике для определения перемещения элементов электромагнитного двигателя применение датчиков перемещения с механическим приводом, а также датчиков дистанционных типов затруднено. Анализ электромеханического энергопреобразования в электромагнитном двигателе сейсмоисточника показал возможность косвенного определения необходимого параметра с использованием измерения электрических величин в системе питания: тока в обмотке и магнитного потока через рабочий зазор.

Сейсмоисточник, мощный короткоходовой электромагнит, рабочий зазор, контроль перемещения излучателя

DOI: 10.15372/FTPRPI20180407

Одна из проблем систем контроля и диагностики — несоответствие используемых датчиков режиму эксплуатации объекта контроля. Необходимые датчики зачастую невозможно применить из-за их чувствительности к таким факторам, как вибрация, влажность, грязь и т. д. При этом системы диагностики часто оборудуются датчиками, неадекватными потребностям. Характерным примером такого объекта контроля являются электромагнитные сейсмоисточники совместной разработки Тольяттинского государственного университета и “Енисейгеофизики” [1, 2]. Они используются при поиске месторождений нефти и газа и предназначены для создания сейсмических волн в земле воздействием импульсов силы в заданных пунктах на ее поверхности. Регистрация и обработка отраженных сейсмических волн позволяет исследовать ее глубинную структуру.

Воздействие на поверхность инициируется пропусканием импульса тока [3] по обмотке 1 индуктора 2 мощного электромагнита (рис. 1). Создаваемая электромагнитом сила P действует между индуктором 2 и якорем 3, соответственно между инерционной опорой 4 и излучателем 5 сейсмических волн. Массивный груз 4 при этом движется вверх, а излучатель 5 — вниз, деформируя грунт. Зазор δ уменьшается и выбирается полностью в момент времени t_δ . После соударения якоря с индуктором они движутся вместе и воздействие электромагнита на грунт силой P прекращается. Последующие воздействия на грунт, возникающие при возврате элементов сейсмоисточника в исходное положение, не синхронизированы с началом основного воздействия, и их вклад отфильтровывается при обработке результатов.

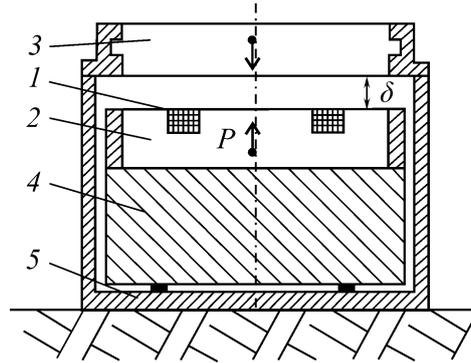


Рис. 1. Электромагнитный сейсмоисточник

На регистрирующей отраженные сейсмические волны аппаратуре работа этих источников контролируется, как предусмотрено изготовителем (“Геотехноцентр”, г. Минусинск), по графику ускорения массивного груза 4, получаемому с закрепленного на нем акселерометра типа ADXL [4]. Следует считать это недостаточным. Сигнал a_d (рис. 2) такого датчика свидетельствует лишь о том, что двигатель сейсмоисточника развивает определенную силу. На графике a_d присутствуют труднообъяснимые колебания. После момента t_δ полного выбора зазора δ сила P не действует на груз 4, а акселерометр выдает график ускорений со значительной амплитудой. Это не отражает реальные физические процессы. Указанный акселерометр, по данным производителя (Analog Devices Inc.), искажает импульсный сигнал следующим образом: длительность фронта и спада сигнала на выходе составляет ~ 1 мс, а задержка спада — 0.4 мс. Для сравнения на рис. 2 приведен график P/m ускорения массивного груза 4, рассчитанный по развиваемой электромагнитным двигателем сейсмоисточника силе P . Таким образом, с помощью акселерометра сложно определить форму импульса силы и длительность ее действия. Что еще более важно, по сигналу a_d невозможно судить о процессе сжатия грунта под излучателем и об эффективности формирования источником сейсмических волн [5].

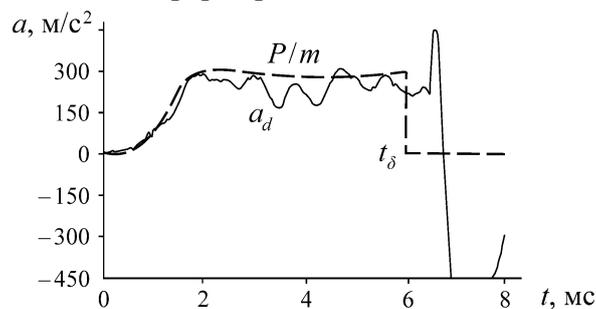


Рис. 2. Графики ускорения массивного груза

Цель настоящей статьи — поиск мер, повышающих адекватность системы контроля работы импульсного электромагнитного сейсмоисточника и позволяющих корректировать режим его работы с целью получения наилучших результатов на различных грунтах. Информацией, позволяющей судить о качестве работы сейсмоисточника, является график сжатия грунта под излучателем 5 — перемещения излучателя при действии на него силы P [5, 6]. Этот график позволяет не только определить исправность сейсмоисточника, но и сделать оценку реологических свойств его нагрузки.

Отметим, что при контроле работы сейсмоисточника важно не столько измерение указанного перемещения, сколько определение его отклонения от измеренного при некотором известном режиме работы [6].

На рис. 3 приведен пример рассчитанных по компьютерной модели [7] графиков перемещения при работе электромагнитного сейсмоисточника “Енисей-СЭМ-50”: x_4 — груза и x_5 — излучателя, а также графиков x_δ выбора зазора δ , начальная величина δ_0 которого равна $5 \cdot 10^{-3}$ м, встречным перемещением якоря и индуктора.

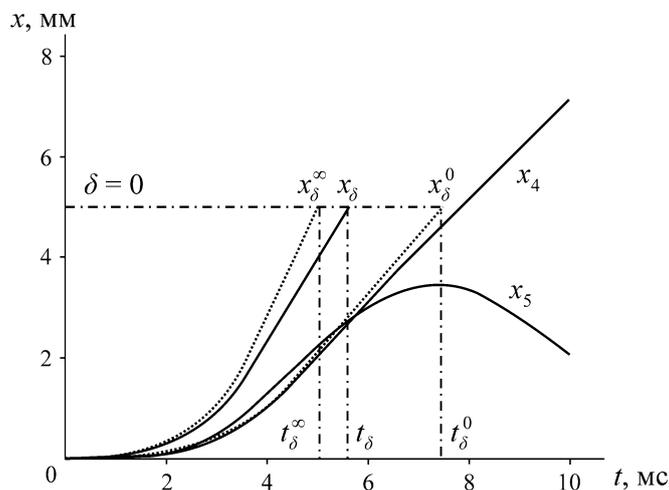


Рис. 3. Рассчитанные графики перемещений элементов сейсмоисточника

График x_δ^0 получен для сейсмоисточника “Енисей-СЭМ-50” при нулевой податливости грунта под излучателем; график x_δ^∞ — при бесконечно большой податливости; график x_δ — при средней на разных грунтах податливости — $1 \cdot 10^{-8}$ м/Н. До момента t_δ , когда зазор δ становится равным нулю, якорь 3 перемещается вместе с излучателем 5 (график x_5), а x_δ определяется по выражению $x_\delta = x_5 - x_4$. Далее, до возврата якоря в исходное положение, графиком перемещения якоря является x_4 . По графику x_δ изменения зазора δ можно судить о соответствии длительности t_δ действия силы P оптимальному воздействию на данный грунт. Для излучателя 5 заданных размеров минимальная длительность t_δ ограничена прочностью грунта, а максимальная — временем, после которого избыточное давление под ним в волне напряжений сжатия в грунте исчезает [8]. В приведенном примере зазор выбирается за $5.3 \cdot 10^{-3}$ с при практически одинаковых к этому моменту перемещениях массивного груза и излучателя, а величина t_δ втрое ближе к значению t_δ^∞ , чем к t_δ^0 . При большей длительности

действия силы P большая часть механической энергии электромагнитного двигателя передается грузу 4 и не участвует в создании “полезных” сейсмических волн. По графику изменения зазора оператор может контролировать величину t_δ и соотношение к моменту t_δ перемещений излучателя x_5 и массивного груза x_4 . Для оценки перемещения излучателя за время t_δ выбора зазора δ сравниваются график x_δ и полученный при установке сейсмоисточника на жесткое массивное основание график x_δ^0 . Их разность является перемещением излучателя, так как график x_δ^0 на интервале $0-t_\delta$ практически идентичен графику x_5 .

Наиболее распространенными являются датчики линейных перемещений, имеющие две точки фиксации [9]. Однако практическое применение датчика такого типа в сейсмоисточнике сопряжено с техническими трудностями. Якорь 3 и индуктор 2 совершают соизмеримые с величиной δ перемещения не только по вертикали, но и по горизонтали. Датчик подвергается сильным ударным нагрузкам. Кроме того, он преобразует механическое перемещение в слабый электрический сигнал, и на его работу вблизи зазора δ и обмоток 1 влияет импульсное магнитное поле большой интенсивности. Бесконтактные датчики, например оптические триангуляционные [9], требуют размещения на неподвижной базе. Но создать ее около сейсмоисточника сложно. Он находится на пункте воздействия непродолжительное время и создает значительные колебания грунта вокруг себя. Неподвижных элементов в его конструкции нет. В указанных условиях целесообразно косвенное определение графика изменения зазора.

ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ ГРАФИКА ИЗМЕНЕНИЯ ЗАЗОРА

Теоретическим решением проблемы может быть расчет на интервале времени $0-t_\delta$ зависимости $x_\delta(t)$ по графикам величин, которые могут быть измерены в схеме электропитания электромагнитного двигателя: тока $i(t)$ в обмотке 1 и магнитного потока $\Phi_\delta(t)$ через зазор δ .

Из физических представлений очевиден общий принцип, что преобразование энергии магнитного поля электромагнитного двигателя в механическую оказывает влияние на изменение тока в его обмотке. Для выявления взаимосвязи тока в обмотке и текущей величины зазора проинтегрируем выражение для напряжения U_{L_δ} на индуктивности обмотки L_δ без учета свойств магнитопровода:

$$U_{L_\delta} = \frac{d(w\Phi_\delta)}{dt} = L_\delta \frac{di_\delta}{dt},$$

где w — число витков обмотки; i_δ — составляющая тока, обусловленная изменением только рабочего зазора. Получаем:

$$\Phi_\delta(t)w = i_\delta(t)L_\delta. \quad (1)$$

После подстановки в (1) выражения для L_δ :

$$L_\delta = w^2 G_\delta, \quad G_\delta = \frac{\mu_0 S_\delta k_v}{4(\delta_0 - x_\delta)},$$

здесь G_δ — магнитная проводимость области зазора δ и его краев; k_v — коэффициент выпучивания; x_δ — уменьшение зазора δ за счет встречного движения якоря и индуктора; S_δ — площадь обращенной к якорю поверхности полюсов индуктора; μ_0 — магнитная постоянная, формула (1) преобразуется к виду:

$$i_{\delta}(t) = \frac{4\Phi_{\delta}(t)}{w\mu_0 S_{\delta} k_v(t)} (\delta_0 - x_{\delta}(t)). \quad (2)$$

Множитель $4\Phi_{\delta} / w\mu_0 S_{\delta} k_v$ кроме констант содержит параметры Φ_{δ} и k_v , значения которых в процессе срабатывания изменяются. Выпучивание магнитного поля (проявление краевого эффекта) у короткоходового электромагнита невелико. Значение коэффициента k_v в электромагнитных сейсмоисточниках при начальном зазоре не превышает 1.1 и в процессе выбора зазора уменьшается до единицы. Поэтому без значительного снижения точности расчета величина k_v может быть аппроксимирована, например, зависимостью $k_v = 1 + [0.1(\delta_0 - x_{\delta})] / \delta_0$, а формула (2) приведена к виду:

$$x_{\delta}(t) = \delta_0 - \frac{i_{\delta}(t)w\mu_0 S_{\delta}}{4\Phi_{\delta}(t) - \frac{0.1i_{\delta}(t)w\mu_0 S_{\delta}}{\delta_0}}. \quad (3)$$

К анализу графика магнитного потока $\Phi_{\delta}(t)$ вернемся позже.

О РЕАЛИЗАЦИИ ПРЕДЛОЖЕННОГО СПОСОБА

Как следует из (2) и (3), величина $\delta_0 - x_{\delta}$ пропорциональна току i_{δ} . Однако определение графика $i_{\delta}(t)$ представляет некоторые сложности, так как измерить можно лишь общий ток $i(t)$ обмотки, на который влияют насыщение магнитопровода и изменение зазора δ . Непосредственно измерить определяющую насыщением магнитопровода составляющую тока i_{μ} не представляется возможным. Чтобы не допустить значительного снижения точности расчета перемещения, измеренный график тока $i(t)$ необходимо пересчитать в график $i_{\delta}(t)$ вычитанием соответствующих рассчитанных значений тока $i_{\mu}(t)$. Составим схему замещения, позволяющую вычислить необходимые составляющие тока. Приведенная на рис. 4а схема получена из схемы формирования импульса тока в обмотке I , содержащей предварительно заряженный в указанной полярности до напряжения U_c конденсатор C и силовые ключи VS, VD [3], заменой обмотки активным сопротивлением r и электрической схемой замещения магнитной системы электромагнита MC .

Схема MC получена дуальным перестроением схемы магнитных сопротивлений, которая, в свою очередь, — заменой основных фрагментов магнитной системы на пути магнитных потоков Φ_{δ} и Φ_S двухполюсными схемными элементами (рис. 4б) [8].

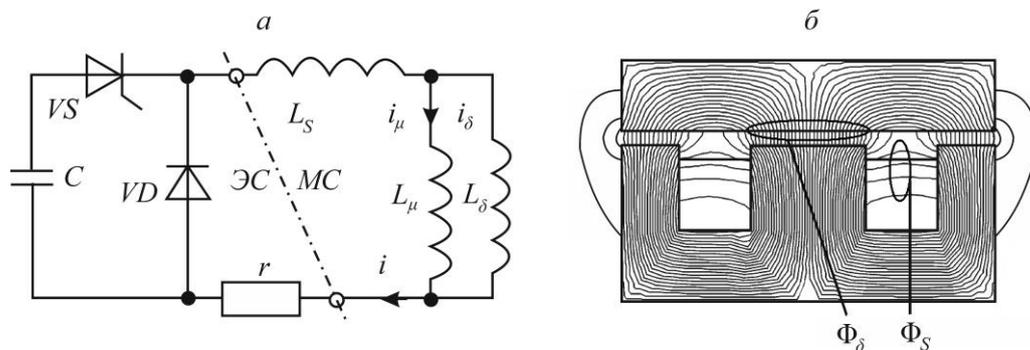


Рис. 4. Электрическая схема замещения электромагнитного двигателя: а, б — картина магнитного поля электромагнитного двигателя

На рис. 4а электрическим аналогом магнитного сопротивления для магнитного потока Φ_δ по зазору δ является индуктивность L_δ , а по магнитопроводам индуктора и якоря — индуктивность L_μ . Электрическим аналогом магнитного сопротивления для потока Φ_S рассеяния служит индуктивность L_S .

При разряде конденсатора C через управляемый ключ VS на обмотку электрическая энергия преобразуется в энергию магнитного поля при практически полном отсутствии магнитомеханического преобразования. Перемещение якоря относительно индуктора за это время составляет 3–4% от полной величины рабочего хода δ (рис. 3). После полного разряда конденсатора C в момент t_p (рис. 5) включается диод VD . Далее происходит основное преобразование энергии магнитного поля в механическую, отражающееся в схеме замещения увеличением индуктивности L_δ . В момент t_δ полного выбора зазора δ процесс преобразования магнитной энергии в механическую прекращается. Об этом свидетельствует резкое изменение производной тока на спаде импульса (рис. 5). После этого момента ток медленно, на протяжении сотен микросекунд затухает.

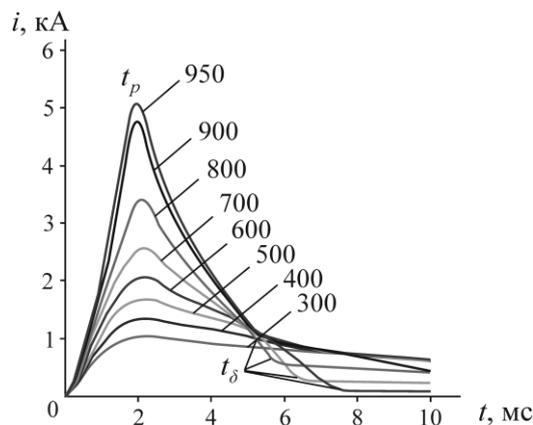


Рис. 5. Осциллограммы тока в обмотке сейсмоисточника “Енисей-СЭМ-50” при выборе зазора δ равным $5 \cdot 10^{-3}$ м при различных напряжениях U_c

В соответствии с расчетом величина i_μ у сейсмоисточника “Енисей-СЭМ-50” изменяется за импульс значительно и весьма сложным образом. При напряжении $U_c = 900$ В и начальной величине зазора $5 \cdot 10^{-3}$ м ток i_μ в момент t_p составляет приблизительно третью часть от тока i (рис. 6). На интервале $t_p - t_\delta$ ток i_μ уменьшается в 1.7 раза.

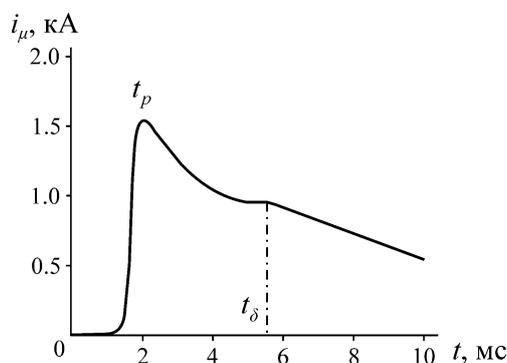


Рис. 6. Рассчитанный график тока i_μ при $\delta_0 = 5 \cdot 10^{-3}$ м, $U_c = 900$ В

В эксплуатации сейсмоисточника изменение оператором начального напряжения на конденсаторе C и, соответственно, соотношения токов i и i_μ не предполагается. При настройке у изготовителя предусмотрено ступенчатое регулирование U_c . Изменение свойств грунта под источником влияет только на длительность интервала $t_p - t_\delta$, а формирование начального участка графика тока $0 - t_p$ происходит при незначительном изменении зазора между якорем и индуктором. Поэтому значения тока i_μ в момент времени t_p и в значительной мере в момент t_δ в эксплуатации остаются практически неизменными, а графики тока i_μ , рассчитанные для нескольких значений начального напряжения U_c , могут быть использованы при построении графика тока $i(t)$.

Режим работы электромагнитного двигателя сейсмоисточника задан близким к “постоянству потокоцепления” на интервале выбора рабочего зазора. При этом преобразование энергии осуществляется наиболее рационально [10, 11]. На интервале $t_p - t_\delta$ за время основного магнитомеханического преобразования, как следует из результатов измерений при установке напряжения на конденсаторе диапазона 500–900 В, значение магнитного потока Φ_δ изменяется менее чем на 10% (рис. 7). Незначительное изменение Φ_δ на интервале $t_p - t_\delta$ обусловлено не превышающей 5 мс длительностью этого интервала при постоянной времени обмотки 0.5 с, а также перераспределением энергии из магнитного поля рассеяния в магнитное поле в зазоре δ в процессе уменьшения зазора [7]. Однако учет изменения $\Phi_\delta(t)$ в (3) позволит повысить точность расчета графика перемещения $x_\delta(t)$ как на интервале $t_p - t_\delta$, так и на интервале $0 - t_\delta$.

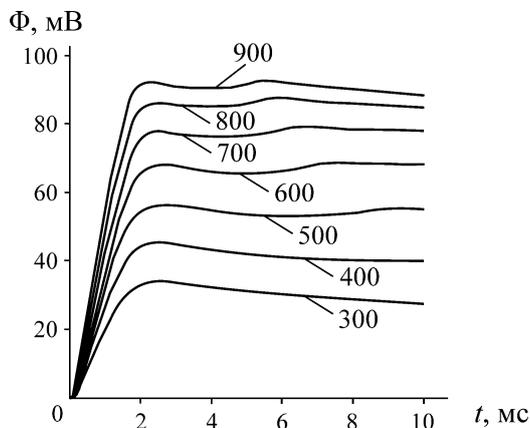


Рис. 7. Осциллограммы магнитного потока Φ_δ в сейсмоисточнике “Енисей-СЭМ-50” при выборе зазора δ равным $5 \cdot 10^{-3}$ м при различных U_c

Получить график магнитного потока $\Phi(t)$ можно интегрированием напряжения на обмотке I электромагнитного двигателя. Измерение не полного магнитного потока, а лишь его части $\Phi_\delta(t)$ позволяет исключить из рассмотрения такие факторы, как рассеяние магнитного поля и диссипацию части электрической энергии на активном сопротивлении r , как и изменение величины r из-за эффекта вытеснения тока. Для этого на средний полюс магнитопровода индуктора в его верхней части, выше зоны присутствия потока Φ_δ (рис. 4б), помещается измерительная обмотка из тонкого изолированного провода. В сейсмоисточнике напряжение на вит-

ках обмотки I достигает 100 В на виток, поэтому измерительная обмотка может быть одновитковой. При указанном витковом напряжении интегратор может быть выполнен в виде пассивной RC -цепи. Именно таким образом получены графики, приведенные на рис. 7.

Таким образом получение при каждом срабатывании сейсмоисточника графика $x_\delta(t)$ с использованием формулы (3) и графиков — измеренных $i(t)$ и $\Phi_\delta(t)$ и рассчитанного $i_\mu(t)$ — позволяет учесть основные факторы энергопреобразования в электромагнитном двигателе импульсного сейсмоисточника. Сравнение графика $x_\delta(t)$ с полем допусков на него, сформированным по результатам выходного контроля сейсмоисточника у изготовителя, даст оператору сейсмостанции возможность оценивать и корректировать работу в конкретных условиях. Упомянутый выходной контроль сейсмоисточника должен быть дополнен определением графиков x_δ^0 при установке его на массивное жесткое основание и x_δ^∞ — при установке на податливых пружинах.

Результаты, полученные при измерении перемещения x_δ механическим датчиком типа СLP13 и предложенным методом, различаются не более чем на 5 % [6].

ВЫВОДЫ

Показано, что существующий способ контроля работы электромагнитного сейсмоисточника с помощью акселерометра не корректен. Информацией, позволяющей судить о качестве работы сейсмоисточника, является график сжатия грунта под его излучателем. Установка на сейсмоисточник датчиков перемещений с механическим приводом или датчиков, требующих создавать неподвижную базу, нецелесообразна.

Рассмотрен метод косвенного определения перемещения излучателя сейсмоисточника по графикам тока электромагнитного двигателя и магнитного потока через рабочий зазор. Для его реализации необходимо иметь построенный в заводских условиях при нагрузке грунта с малой податливостью график $x_\delta^0(t)$ выбора зазора и рассчитанный по математической модели при рекомендованной для эксплуатации начальной величине напряжения U_c график тока i_μ . Перспективность этого решения обусловлена простотой и надежностью метода получения информации — сигналы тока и магнитного потока снимаются датчиками, не содержащими подвижных элементов, без существенных помех.

Метод позволит повысить адекватность системы контроля работы импульсного электромагнитного сейсмоисточника и даст оператору информацию для наилучшего согласования сейсмоисточника с конкретной нагрузкой грунта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щадин П. Ю. Импульсные электромагнитные сейсмоисточники “Енисей”. Обзор моделей и опыт практического применения // Приборы и системы разведочной геофизики. — Саратов, 2005. — № 4. — С. 6–12.
2. Сейсморазведка. Производство импульсных источников. URL: <http://http://gseis.ru/our-business/field-seismic-works/impulse-technique/> (дата обращения 20.03.2018).
3. Певчев В. П. Особенности системы импульсного питания электромагнитного двигателя источника сейсмических волн // Вестн. КГТУ им. А. Н. Туполева. — 2009. — № 3. — С. 62–66.

4. **Accelerometers.** URL: <http://www.analog.com/en/products/mems/accelerometers.html> (дата обращения 20.03.2018).
5. **Боганик Г. Н., Гурвич И. И.** Сейсмическая разведка. — М.: Недра, 1980. — 551 с.
6. **Пат. 2265234 РФ, МПК G 01V 1/38.** Способ определения деформации грунта излучающей плитой-антенной импульсного сейсмоисточника с электромагнитным приводом / В. В. Ивашин, Н. А. Иванов // Опубл. в БИ. — 2005. — № 33.
7. **Pevchev V. P.** The use of micro-cap software to simulate operating processes of electromechanical impulse devices, Russian Electrical Engineering, 2010, Vol. 81, No. 4. — P. 213–216.
8. **Харкевич А. А.** Избранные труды. Т. 1. Теория электроакустических преобразователей. Волновые процессы. — М.: Наука, 1973. — 400 с.
9. **Sensor Systems.** Датчики линейных перемещений. URL: http://www.sensor-systems.ru/category_11.html (дата обращения 20.03.2018).
10. **Мошкин В. И., Угаров Г. Г.** Влияние режимных и конструктивных параметров линейных электромагнитных двигателей на эффективность электромеханического преобразования энергии // Вестн. СГТУ. — 2012. — № 2 (66). — Вып. 2. — С. 124–129.
11. **Мошкин В. И., Угаров Г. Г.** Энергетические режимы импульсных линейных электромагнитных двигателей // Труды IX междунар. конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2016. — 2016. — С. 71–76.

Поступила в редакцию 28/IV 2018