

УДК 621.318.3(088.8)

## МАКСИМАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ МОЩНОГО КОРТКОХОДОВОГО ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ДВИГАТЕЛЯ СЕЙСМОИСТОЧНИКА

© 2011 В.П. Певчев

Тольяттинский государственный университет

Поступила в редакцию 02.06.2011

Рассматриваются возможности форсировки короткоходового импульсного электромагнитного двигателя. Составлена расчётная модель процесса срабатывания двигателя. Проведён анализ влияния первичной энергии на основные характеристики двигателя. Предложены рекомендации по выбору значений форсировки.

Ключевые слова: импульсный сейсмоисточник, электромагнитный двигатель, энергия.

### ВВЕДЕНИЕ

В вибрационных и импульсных технологиях в качестве источников низкочастотных (до 100 Гц) генераторов мощных механических импульсов могут применяться электромагнитные двигатели. Например, для формирования сейсмических волн при сейсморазведке полезных ископаемых и исследовании строения земной коры без буровзрывных работ в настоящее время используются сейсмоисточники с приводом на короткоходовых импульсных электромагнитах [1] с зазором между якорем и индуктором, составляющим  $(4 - 5) \cdot 10^{-3}$  м. Такие короткоходовые электромагнитные двигатели обеспечивают необходимые для технологий сейсморазведки значения развиваемой в течение нескольких миллисекунд механической силы ( $10^5 - 10^6$  Н) при сравнительно высокой эффективности преобразования электрической энергии в механическую (КПД до 90%).

Известно, что развиваемая электромагнитом сила ограничена насыщением его ферромагнитного магнитопровода. Удельная на единицу массы сила в использующихся в сейсмоисточниках короткоходовых электромагнитных двигателях не превышает 1000 Н/кг ( $\text{м/с}^2$ ). Увеличить развиваемую электромагнитом силу (максимальную и удельную) можно увеличением электромагнитных нагрузок: плотности тока в обмотках и индукции магнитного поля в магнитопроводе. Для импульсных устройств, в основном, увеличением индукции. Режим работы с насыщением магнитопровода позволяет получать прирост удельных значений развиваемой электромагнитом силы и механической энергии, однако обуславливает снижение КПД.

*Певчев Владимир Павлович, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной электроники.  
E-mail: V.Pevchev@tltsu.ru.*

Очевидно, что максимальное значение удельной механической энергии электромагнитного двигателя ограничиваются стоимостью его и системы его возбуждения, а также ограничением массы конструкции. Решить проблему рационального выбора максимальных значений силы и механической энергии разработчику может помочь анализ изменения основных показателей короткоходового импульсного электромагнитного привода при увеличении энергии, вводимой в магнитное поле его двигателя.

### УСЛОВИЯ И ДОПУЩЕНИЯ

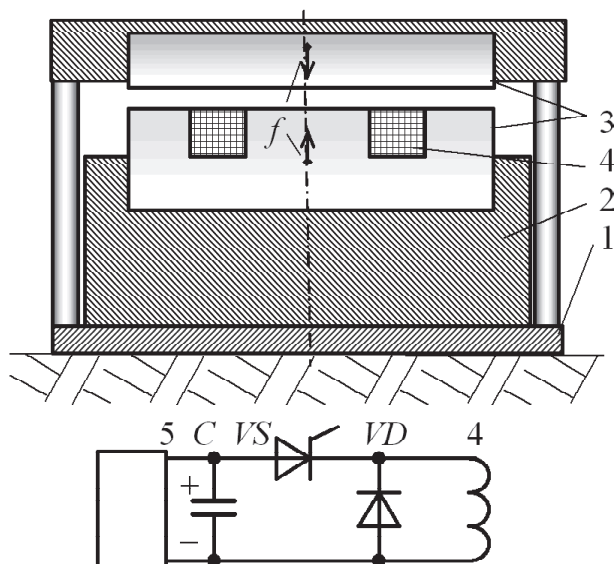
Основное энергопреобразование в короткоходовом электромагните происходит в зазоре прямоугольного сечения при практически равномерном магнитном поле в нём. Поэтому значение развиваемой им силы  $f$  следует определять формуле Максвелла:

$$f = \frac{1}{2\mu_0} \int_{S_{\delta}} B_{\delta}^2 dS,$$

где  $\mu_0$  – магнитная проницаемость воздуха;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $B_{\delta}$  – индукция в рабочем зазоре  $\delta$  на поверхности якоря, Тл;  $S_{\delta}$  – площадь всей поверхности якоря. Без учёта сил, создаваемых потоками выпучивания, которые для короткоходового электромагнита невелики и частью взаимно компенсируются, сила электромагнита при допущении равномерности магнитного поля в зазоре пропорциональна расчётной площади  $S_{\delta}$  сечения зазора:

$$f \approx \frac{B_{\delta}^2 S_{\delta}}{2\mu_0}. \quad (1)$$

Рассмотрим в качестве примера силовой модуль электромагнитных сейсмоисточников “Ени-



**Рис. 1.** Структура электромагнитного сейсмоисточника и схема его возбуждения

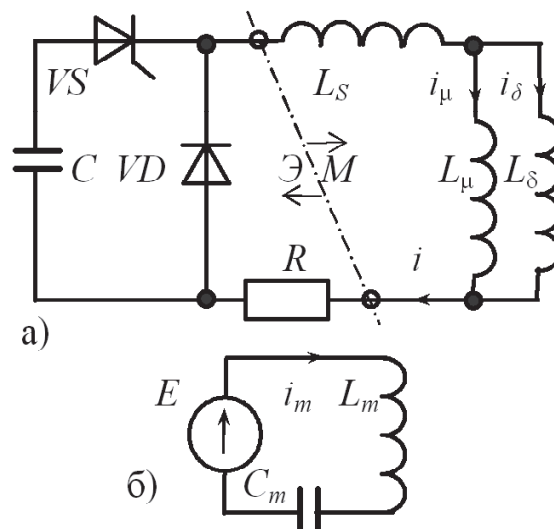
сей” [2] (рис. 1). На жёсткую плиту – излучатель 1 опирается массивный груз 2. При приложении генерируемой импульсным электромагнитным двигателем 3 механической силы  $f$  груз подлетает вверх, а излучатель движется вниз, сжимая грунт и тем самым, формируя в нём сейсмическую волну. Сила  $f$  возникает при разряде конденсаторного накопителя  $C$  энергии через полупроводниковый тиристорный ключ  $VS$  на обмотку 4 возбуждения электромагнитного двигателя. После разряда накопителя до нуля включается диод  $VD$ , а тиристор  $VS$  выключается. Накопитель заряжается в промежутке между срабатываниями зарядным устройством 5.

Для оценки основных характеристик импульсного электромагнита при увеличении электромагнитных нагрузок на этом примере проведём численный расчёт процесса срабатывания с использованием электрической схемы замещения трёх систем [3]: электрической, магнитной и механической (рис. 2).

Электрическая ( $\mathcal{E}$ ) схема моделирует в расчёте активное сопротивление  $R$  обмоток, а также два интервала работы электромагнитного привода: ввод энергии в магнитное поле электромагнита при разряде конденсатора  $C$  на обмотку через тиристор  $VS$  и работу при шунтировании её диодом  $VD$ .

Индуктивность обмотки 4 в расчётной модели представлена электрической схемой замещения магнитной системы ( $M$  на рис. 2,а) [3], содержащей индуктивности  $L_\delta, L_\mu, L_S$ , замещающие, соответственно, магнитные проводимости зазора и магнитопровода, а также магнитную проводимость для потока рассеяния.

Моделирующая насыщение магнитопровода электромагнита индуктивность  $L_\mu$  может быть



**Рис. 2.** Расчётная схема замещения электромагнитного сейсмоисточника

определена в программах анализа электронных схем, построенных на основе языка SPICE [4], с использованием элемента “магнитный сердечник”, либо рассчитана по формуле:

$$L_\mu = w^2 \frac{\mu_{C(B)}(S_\delta / 2)}{l_C}, \quad (2)$$

где  $l_C$  – длина силовой линии магнитного поля в магнитопроводе:  $l_C = 0.5$  м; площадь  $S_\delta = 0.18$  м<sup>2</sup>;  $\mu_{C(B)}$  – магнитная проницаемость материала магнитопровода в функции индукции магнитного поля. Индуктивность  $L_S$  в случае короткоходового электромагнита сравнительно мала и в расчётах принимается постоянной, а учитывающая процесс выбора зазора индуктивность  $L_\delta$  рассчитывается по формуле:

$$L_\delta = w^2 \frac{\mu_0(S_\delta / 2)}{2\delta}. \quad (3)$$

Приведённая на рис. 2,б упрощённая электрическая схема замещения механической системы привода содержит замещающий электромагнитную силу  $f$  (1) источник ЭДС  $E$ , замещающую массу  $m$  нагрузки электромагнита индуктивность  $L_m$  и замещающую податливость нагрузки электромагнита ёмкость  $C_m$  [5]. Сопротивлением механических потерь при малой длительности процесса выбора зазора  $\delta$  можно пренебречь. В случае сейсмоисточника подвижным является не только якорь, но и индуктор, поэтому масса  $m$ :

$$m = 1 / \left( \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right) \leftrightarrow L_m, \quad (4)$$

где  $m_1, m_2$  – массы элементов привода, приведённые к якорю и индуктору. Необходимое для рас-

чѐта величин  $\delta$  и  $L_\delta$  встречное перемещение масс  $m_1, m_2$  определяется интегрированием тока  $i_m$ .

В расчѐтах величину первичной энергии  $A_0$ , запасѐнной в накопителе  $C$ , будем задавать, изменяя в диапазоне (500 – 2000) В напряжение на нём, при этом длительность разряда накопителя на обмотку 4 изменяется в диапазоне  $(1.8 - 1.3) \cdot 10^7$  с. В рассматриваемом примере накопитель имеет ёмкость 0.005 Ф, а обмотка – пять витков и сопротивление  $R = 0.09$  Ом (без учёта эффекта вытеснения тока). В расчѐте использованы модели тиристора  $VS$  типа Т473–2000–20 и диода  $VD$  такого же класса по току и напряжению.

При анализе будем оценивать максимальные значения тока  $I_{max}$  возбуждения и индукции  $B_{max}$  магнитного поля в зазоре, а также на момент  $t_\delta$  времени выбора зазора  $\delta$  между якорем и индуктором электромагнита значения  $I_\mu$  тока возбуждения, механической энергии  $A_M$ , энергии  $A_\mu$  магнитного поля (остающейся неиспользованной после выбора зазора), энергии потерь  $A_R$  – в электромагните и  $A_V$  – в системе электропитания: в накопителе  $C$ , на вентилях  $VS$ ,  $VD$  и на соединительных проводах. Применением схмотехнических решений системы возбуждения могут быть осуществлены рекуперация энергии  $A_\mu$  в накопитель  $C$  и её последующее использование, поэтому  $A_\mu$  не отнесена к потерям. КПД  $\eta$  электромагнитного привода и коэффициент  $k_\mu$  насыщения магнитной системы его электромагнитного двигателя будем рассчитывать по формулам:

$$\eta = \frac{A_M}{A_0 - A_\mu}, k_\mu = 1 + \frac{I_\delta}{I_{max}} \quad (5)$$

Характерной особенностью конструкции магнитопроводов электромагнитных двигателей

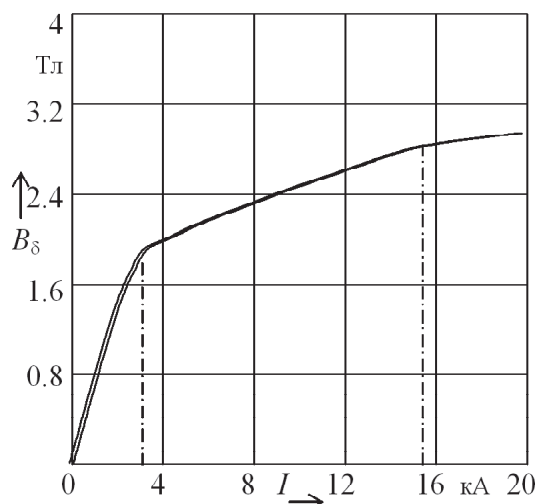


Рис. 3. Кривая намагничивания электромагнита при зазоре  $\delta$ , равном 5 мм

сейсмоисточников является значительно меньшей по сравнению с площадью сечения ярма индуктора и якоря площадь сечения полюсов индуктора. Поэтому представленная на рис. 3 кривая намагничивания такого двигателя при начальном положении его якоря относительно индуктора имеет два “перегиба”, которые обусловлены насыщением, соответственно, полюсов и ярма. Величина потерь энергии на вихревые токи и гистерезис, эквивалентная площади петли гистерезиса, при выполнении магнитопровода из листовой холоднокатаной среднелегированной стали невелика – в этом примере ширина петли в масштабе рис. 3 практически соответствует толщине линии графика. В расчѐтах эти потери включены в величину  $A_R$ .

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассчитанные по описанной численной модели графики приведены на рис. 4 – 6. При  $A_0 < A_1$  длительность  $t_\delta$  (рис. 4) при увеличении  $A_0$  уменьшается значительно больше, чем при  $A_0 > A_1$ , что может служить аргументом при проектировании электромагнитного привода: длительность выбора зазора  $\delta$  более стабильна у форсированных электромагнитных двигателей.

При  $A_0 < A_1$  КПД  $\eta$  электромагнитного привода максимален, при этом магнитопровод насыщен незначительно,  $B_{max} = 1.7$  Тл (рис. 4). Из графиков на рис. 5 следует, что при увеличении энергии  $A_0$  производная  $A'_M$  от механической энергии

$$A'_M = \frac{dA_M}{dA_0}, A'_n = \frac{d(A_R + A_V)}{dA_0} \quad (6)$$

положительна и незначительно уменьшается, то есть механическая энергия  $A_M$  электромагнит-

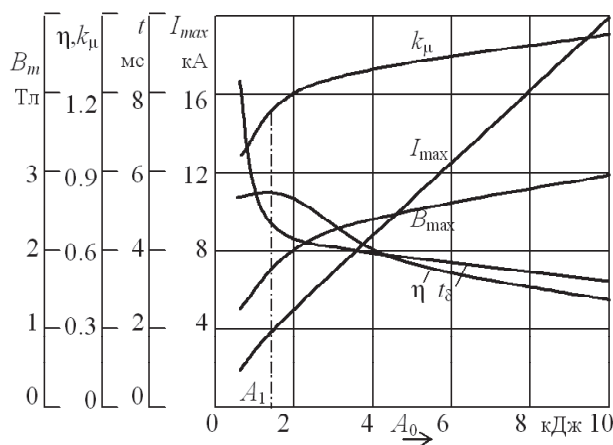
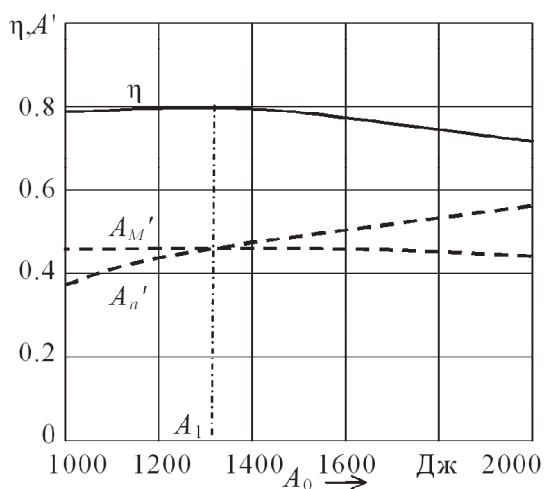
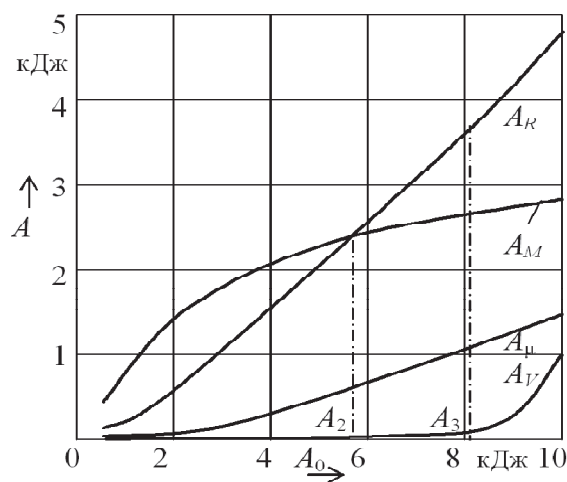


Рис. 4. Влияние величины первичной энергии  $A_0$  на основные характеристики короткоходового импульсного электромагнитного привода



**Рис. 5.** Влияние величины  $A_0$  на скорости изменения энергии



**Рис. 6.** Влияние величины  $A_0$  на составляющие энергии

ного двигателя при увеличении энергии  $A_0$  возрастает. Потери энергии  $A_R + A_V$  при увеличении  $A_0$  тоже возрастают, но в отличие от энергии  $A_M$  тем больше, чем больше  $A_0$  (график  $A_n'$ ). Очевидно, что увеличение потребляемой рассматриваемым электромагнитным приводом энергии с целью форсировки свыше величины  $A_1$  возможно, но при этом КПД будет снижаться.

При величине  $A_0 = A_2$ , потери энергии  $A_R + A_V$  становятся равными величине механической энергии (рис. 6). При увеличении  $A_0 > A_3$  рост потерь энергии  $A_R$  становится более существенным, так как в магнитопроводе электромагнитного двигателя насыщаются уже не только полюса, но и ярмо. В рассматриваемом приводе, кроме того, при этом резко возрастают потери энергии  $A_V$  в вентилях системы возбуждения (ток через них, приближается к их максимальному для заданной длительности импульса току).

По возможностям увеличения потребляемой электромагнитным приводом энергии и, соответственно, механической, можно сказать следующее:

- Уровень механической энергии, соответствующий условию  $A_0 = A_1$  и максимальному КПД, можно использовать при допустимой избыточной массе электромагнита. Ограничение величины механической энергии по такому критерию может применяться для многих устройств, у которых важнейшим показателем является эффективность использования энергии. Что же касается длительности  $t_\delta$  выбора зазора, то мощный импульсный сейсмоисточник, при  $A_0 = A_1$  может иметь недостаточное быстродействие ( $5.7 \cdot 10^3$  с в примере). Длительность  $t_\delta$  значительно приближается к своему минимуму и становится слабо зависящей от форсировки взятого в качестве примера электромагнита при  $A_0 > 2000$  Дж, и индукции  $B_{max}$  в зазоре, более 2 Тл. Поэтому при проектировании электромагнитного привода сейсмоисточников “Енисей”

было рекомендовано уровень 2000 Дж энергии  $A_0$  одного силового модуля не превышать.

- Выбор режима форсированного возбуждения рассмотренного короткоходового электромагнитного двигателя в диапазоне энергий  $A_1 < A_0 < A_3$  характеризуется увеличением потерь энергии, для компенсации которых необходимы затраты на увеличивающийся конденсаторный накопитель  $C$  и прочие силовые элементы системы возбуждения. При определённых условиях (при стремлении снизить массу привода) такие значения всё же могут считаться рациональными.

- При величине энергии  $A_0 > A_3$ , когда резко увеличиваются потери энергии в доступных проектировщику полупроводниковых ключах и значительно насыщается весь магнитопровод электромагнита, включая ярмо, затраты на увеличение мощности системы возбуждения могут возрасти настолько, что может оказаться рациональным использование не электромагнитного, а какого-либо другого привода, например электродинамического.

Возможности увеличения механической энергии показаны на рис. 7 на примере энергетических диаграмм рассмотренного электромагнитного привода, построенных при различных значениях энергии  $A_0$ . По диаграммам видно, что рост площади диаграммы, эквивалентной механической энергии  $A_M$ , при увеличении  $A_0 > 2000$  Дж замедляется, а при  $A_0 > A_3$  практически прекращается.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Певчев В. П. Определение главных размеров короткоходового электромагнитного двигателя источника сейсмических волн и их соотношений // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2009. № 4. С. 76-86.
2. Щадин П. Ю. Импульсные электромагнитные сейс-

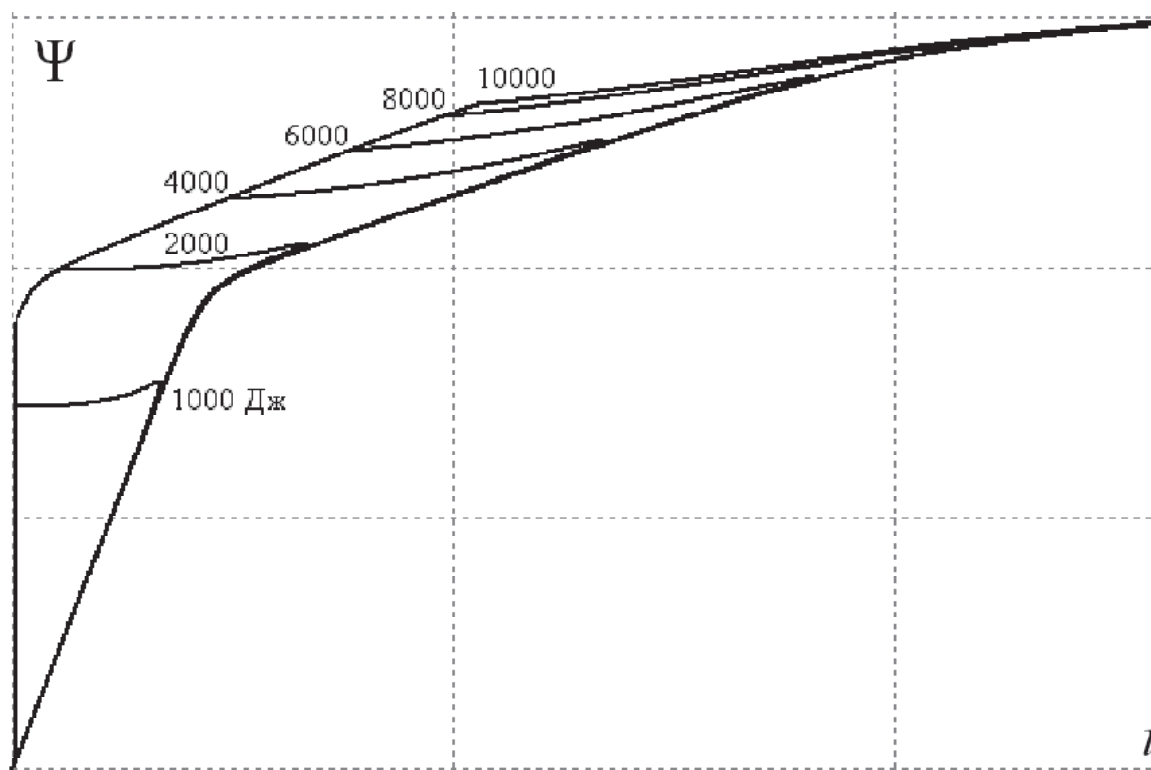


Рис. 7. Энергетические диаграммы электромагнита при различных значениях  $A_0$

моисточники “Енисей”. Обзор моделей и опыт практического применения // Приборы и системы разведочной геофизики. Саратов: 2005. № 4. С. 6-12.

3. Певчев В. П. Использование программы Micro-CAD при моделировании процесса срабатывания импульсных электромеханических устройств // Электро-

техника, 2010. № 4. С. 55-59.

4. Разевиг В.Д. Применение программ P-CAD и P-Spice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ; в 4 вып. // М.: Радио и связь, 1992.
5. Гамбурцев Г.А. О составлении электромеханических аналогий // Доклады академии наук, 1935. № 8-9. 303 с.

## MAXIMUM OF MECHANICAL ENERGY OF POWERFUL SHORT-STROKE PULSED ELECTROMAGNETIC MOTOR OF SEISMIC WAVE GENERATOR

© 2011 V.P. Pevchev

Togliatti State University

The article analyzes increase by the mechanical energy of short-stroke pulsed electromagnetic motor. Receive the calculating model of process its work. Are analyzed the influence primary energy on the main characteristics of this motor. Offered to references by the choose a value of primary energy.

Key words: seismic wave generator, electromagnetic motor, energy.