

15. Urmalis Alberts. Использование энергии ветра. ЗД253, 1977, № 3, сер. 21 Д.
16. Melargno Michele. Разработка мощных ветроэлектростанций в США. 8Д186, 1977, № 8, сер. 21 Д.
17. Справочник по проектированию электро-энергетических систем. М., Энергия, 1977.

УДК 538.4

МК-ГЕНЕРАТОРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРЕХОДА ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО МАТЕРИАЛА В ПРОВОДЯЩЕЕ СОСТОЯНИЕ

Е. И. Биченков, С. Д. Гилев, А. М. Трубачев
(Новосибирск)

В настоящее время известен ряд взрывных генераторов, предназначенных для получения мощных импульсов электрического тока и сильных магнитных полей [1—6]. В этих устройствах энергия ВВ преобразуется в электромагнитную энергию с помощью проводников, движущихся в магнитном поле. Так, в МК-генераторах роль движущихся проводников выполняют металлические части электрического контура, а во взрывных МГД-генераторах — высокоскоростной поток проводящих продуктов взрыва.

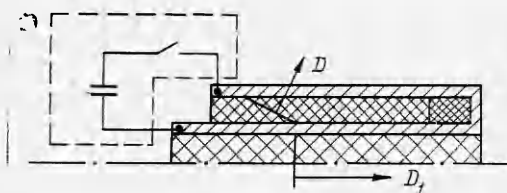
В [7] предложен отличный от указанных способ формирования движущегося проводника. Для этого используется материал, имеющий в области разумных давлений фазовый переход полупроводник — металл. При прохождении ударной волны по такому материалу за ее фронтом образуется проводящий слой. Если ударная волна распространяется поперек магнитного поля, то в слое будет возбуждаться ЭДС индукции, что при замкнутой конфигурации ударных волн и ограничивающих проводников может приводить к захвату магнитного потока и его кумуляции.

В данной работе приводятся экспериментальные результаты испытания генераторов на кремнии, а также некоторые оценки их параметров, выполненные в рамках электротехнической модели.

1. Эксперименты проводились с генераторами плоской и коаксиальной конструкций. В качестве рабочего вещества был выбран кремний марки КП-1 в виде порошка с размером зерен 0,1—0,15 мм. Давление фазового перехода кристаллического кремния определено в [8] из статических экспериментов и составляет около 120 кбар, причем проводимость кремния в металлической фазе близка к проводимости обычных металлов.

Схема коаксиального генератора приведена на фиг. 1. Генератор изготовлен из медных трубок, сваренных на одном из концов друг с другом. Эта часть генератора длиной 10 мм служит нагрузкой, где устанавливается индуктивный датчик для измерения тока в генераторе. Длина рабочей части генератора равна 300 мм. Диаметр внешней трубки 30 мм, толщина стенки 2 мм, диаметр внутренней трубки 18 мм, толщина стенки 1,5 мм. Пространство между трубками заполняется кремнием, который уплотняется трамбовкой. Заряд ВВ ТГ50/50 заливается во внутреннюю трубку.

Начальный ток в генераторе создавался разрядом конденсаторной батареи. В момент максимума начального тока заряд ВВ инициировался в точке, противоположной нагрузке. С выходом ударной волны в кремний в нем формируется проводящий слой, который замыкает шины генера-



Ф и г. 1

тора и, двигаясь вместе с волной детонации в сторону нагрузки, сжимает магнитный поток.

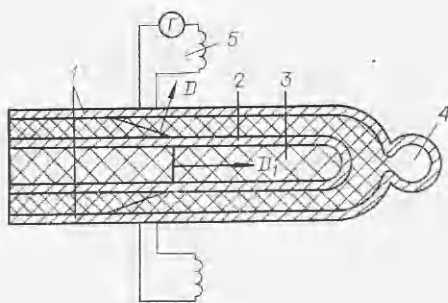
Осциллограммы тока и производной тока в генераторе приведены на фиг. 2 (кривые 1, 2). Начальный ток составлял 6,7 кА, конечный 27 кА, здесь же приведены осциллограммы контрольного эксперимента (кривые 3, 4), в котором генератор заполнялся кварцевым порошком. Отсутствие усиления тока и его обрыв в начальной стадии работы генератора свидетельствуют о том, что наличие порошка между шинами генератора препятствует их непосредственному замыканию. Метки времени на всех осциллограммах 100 кГц.

Схема генератора плоского типа приведена на фиг. 3. Он состоит из медных шин 1 шириной 15—20 мм и толщиной 1 мм, между которыми размещается кассета 2 из меди с зарядом ВВ 3. Нагрузкой генератора служит одновитковый соленоид 4 с внутренним диаметром 8 мм, где размещался индуктивный датчик для измерения тока в нагрузке. Расстояние между шинами было 32 мм, а толщина кассеты с зарядом ВВ ТГ50/50 равнялась 12 мм. Длина генераторов варьировалась в разных экспериментах от 200 до 270 мм.

В этих устройствах начальный магнитный поток создавался или с помощью внешнего электромагнита 5 с временем нарастания тока значительно более длинным, чем время работы генератора, или подключением шин генератора непосредственно к конденсаторной батарее (на фиг. 3 не показано).

Осциллограмма производной тока в нагрузке такого генератора при запитке от конденсаторной батареи приведена на фиг. 4. Начальный ток в генераторе равен 3,3 кА, конечный 9,1 кА. Метки времени 100 кГц.

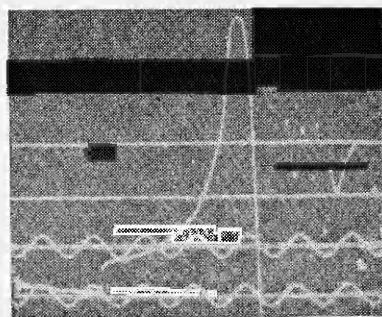
Осциллограмма работы плоского генератора во внешнем поле аналогична приведенной. Начальное магнитное поле в области расположения генератора было 3 кГс, а ток в генераторе к концу работы достигал величины 2,5 кА.



Ф и г. 3



Ф и г. 2



Ф и г. 4

2. Уравнение, описывающее работу генератора в случае, если начальное поле создается током, протекающим по его шинам, имеет вид

$$(2.1) \quad \frac{d}{dt}(LI) + \left[R - \left(1 - \frac{u}{D} \right) \frac{dL}{dt} \right] I = 0$$

и отличается от известных уравнений МК-цепи [9] наличием слагаемых с коэффициентом u/D , описывающих конвекцию поля, замороженного в образующийся при фазовом переходе проводник. Здесь D — скорость ударной волны в кремнии; u — массовая скорость за ударной волной; R — сопротивление цепи генератора.

В экспериментах испытаны непрофилированные генераторы, поэтому примем скорость изменения индуктивности постоянной. Тогда решением уравнения (2.1) с начальными условиями $L(0) = L_0$, $I(0) = I_0$ будет

$$(2.2) \quad I = I_0 \left(\frac{L_0}{L} \right)^{\frac{u}{D} - \frac{R}{|\dot{L}|}}.$$

Полученное решение сохраняет степенную зависимость усиления тока от коэффициента перестройки цепи L_0/L , как и в классических МК-генераторах. Однако показатель степени определяется не только магнитным числом Рейнольдса МК-цепи $|\dot{L}|/R$, но и отношением скорости конвекции u поля с движущимся проводником к скорости ударной волны D . Следует заметить, что скорость изменения индуктивности генератора $\dot{L}$ (сопротивление генерации) определяется скоростью D_1 перемещения границы области высокого давления вдоль проводников генератора. В случае наклонного распространения ударной волны в веществе, как показано на фиг. 1, 3, эта скорость отлична от скорости D ударной волны и связана с ней соотношением $D_1 \sin \gamma = D$, где γ — угол наклона ударной волны к направлению распространения детонационной волны в заряде ВВ.

При работе плоского генератора во внешнем поле B_0 уравнение цепи имеет вид

$$(2.3) \quad \frac{d}{dt}(LI) + \left[R - \left(1 - \frac{u}{D} \right) \frac{dL}{dt} \right] I = \frac{uaB_0}{\sin \gamma},$$

где a — ширина канала генератора. Решением уравнения (2.3) с начальными условиями $L(0) = L_0$, $I(0) = 0$ будет

$$(2.4) \quad I = \frac{B_0 h}{\mu_0 \left(1 - \frac{RD}{|\dot{L}|u} \right)} \left[\left(\frac{L_0}{L} \right)^{\frac{u}{D} - \frac{R}{|\dot{L}|}} - 1 \right],$$

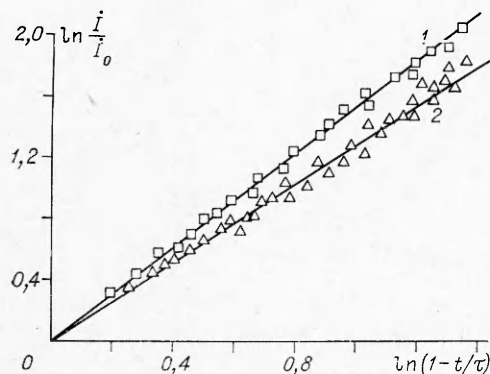
где h — высота канала генератора.

Из (2.2) следует, что ток в генераторе будет расти, если

$$(2.5) \quad R < \frac{u}{D} |\dot{L}|.$$

Это условие при $u = D$ совпадает с полученным в [9] условием возрастания тока в МК-цепи, а при $u < D$ накладывает более сильные ограничения на допустимую величину активного сопротивления цепи R .

Для управления формой импульса тока в [9] предложено профилировать шины генератора. Условие (2.5) показывает, что формой импульса тока в генераторе с наполнителем можно управлять в некоторых пределах, изменяя отношение u/D , которое зависит от распределения заряда ВВ по длине генератора и плотности забивки наполнителя.



Ф и г. 5

Отмеченные особенности усиления тока и увеличения энергии специфичны для генераторов с переходом вещества в проводящее состояние и связаны с конвективным уносом потока из таких генераторов даже при идеальной проводимости. Для увеличения эффективности рассматриваемых генераторов необходимо выбирать вещества с высокой сжимаемостью, для которых u в наибольшей степени приближается к D . Этим соображением обусловлен выбор порошкового кремния в описанных экспериментах.

3. Из осциллограмм производной тока по времени можно получить оценку величины сопротивления цепи испытанных генераторов. На фиг. 5 в координатах $\ln(I/I_0) - \ln(1 - t/\tau)$, где τ — время сжатия полости генератора, I_0 — начальный скачок производной тока в момент замыкания цепи, изображены результаты обработки трех экспериментов с плоскими (точки 1) и четырех экспериментов с коаксиальными (точки 2) генераторами. Для генераторов с постоянными R , L , u/D из (2.2), (2.4) следует, что зависимость $\ln(I/I_0)$ от $\ln(1 - t/\tau)$ должна изображаться прямой линией, с наклоном, определяемым показателем степени в (2.2), (2.3). Результаты экспериментов удовлетворительно согласуются с такого рода зависимостью, что позволяет оценить величину активного сопротивления проводящей пробки в кремнии и шин генератора. При этом величина u/D была измерена в отдельных экспериментах рентгенографированием прохождения ударной волны в порошковом кремнии с расположенными в нем метками из тонкой свинцовой фольги. Полученные значения активного сопротивления для проанализированных экспериментов оказались не более 0.1 мОм. Низкое активное сопротивление цепи показывает, что сопротивление кремния в сжатом состоянии близко к сопротивлению металлического контакта. Однако утверждать, что в наших экспериментах низкое сопротивление кремния объясняется его переходом в металлическую фазу, было бы необоснованно, так как не исключено влияние термического возбуждения на увеличение проводимости порошкового кремния при ударном сжатии.

Используя (2.2) и пренебрегая активным сопротивлением цепи, энергию в генераторе можно представить в виде

$$(2.6) \quad \varepsilon = \varepsilon_0 (L_0/L)^{2u/D-1}.$$

Отсюда следует, что энергия, запасенная в генераторе, будет расти при условии

$$(2.7) \quad 2u > D.$$

Аналогично из (2.4) следует, что энергия, связанная с начальным магнитным полем в генераторе, будет расти в процессе его работы при выполнении того же условия (2.7).

Поступила 28 III 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. Fowler C. M., Garn W. B., Caid R. S. Production of very high magnetic fields by explosion.— JAP, 1960, vol. 31, N 3.
2. Людаев Р. З., Сахаров А. Д. и др. Магнитная кумуляция.— ДАН СССР, 1965, т. 165, № 1.
3. Биченков Е. И. Взрывные генераторы.— ДАН СССР, 1967, т. 174, № 4.
4. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля.— М., Мир, 1972.
5. Shearer J. W., Abraham F. F., et al. Explosive-driven magnetic field compression generators.— JAP, 1968, vol. 39, N 4.
6. Джонс М., Мак-Киннон Ч., Блэкмен В. Генерация кратковременных импульсов в линейных МГД-генераторах.— В кн.: Прикладная магнитная гидродинамика. М., Мир, 1965.
7. Биченков Е. И., Скоробогатых Н. Г., Трубачев А. М. Магнитно-кумулятивный генератор. Автор. свидетельство 2708486/24—25.
8. Bundy F. P. Phase diagrams of silicon and germanium to 200 kbar, 1000°C.— J. Chem. Phys., 1964, vol. 41, N 12.
9. Биченков Е. И., Войтенко А. Е., Лобанов В. А., Маточкин Е. П. Схема расчета и включение на нагрузку плоских взрывомагнитных генераторов.— ПМТФ, 1973, № 2.

УДК 538.4

МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПРОДУКТАХ ГАЗИФИКАЦИИ БУРЫХ УГЛЕЙ

В. А. Деревянко, В. С. Славин, В. С. Соколов
(Красноярск)

Одним из основных направлений развития современной теплоэлектроэнергетики является все большая ее переориентация на использование низкокачественных углей. Одновременно подобные угли рассматриваются и как сырье для производства моторного топлива.

На наш взгляд, одним из перспективных способов комплексной переработки угля с одновременным производством электроэнергии и химических продуктов является использование МГД-преобразователей энергии. Принципиальные основы этого подхода изложены в [1], поэтому данная работа касается лишь вопросов, связанных с созданием самого МГД-генератора.

В основе рассматриваемой концепции лежит явление T -слоя, изучению которого посвящены работы [2—9]. Достаточно ясное понимание физической сущности этого явления позволяет приступить с полным основанием к разработке теории генератора как газодинамической, тепловой и электрической машины. Существенным дополнением к этим основаниям являются экспериментальные исследования по искусственному инициированию T -слоя в линейном канале, предварительные результаты которых излагаются в нашей работе.

1. Экспериментальное исследование моделей МГД-генераторов с T -слоем. Эксперименты по искусственному инициированию T -слоя проводились на установке, имеющей прямоугольный МГД-канал со сплошными электродами. Сечение канала 50×50 мм², длина электродной части 200 мм, внешнее магнитное поле $B_0 \leq 1$ Т. Поток рабочего газа (гелий с примесью водорода) с параметрами $T \approx 4000$ К, $p \approx 1$ ат и $u = 5$ км/с создавался электроразрядной ударной трубой и имел стационарные параметры на входе в МГД-канал в течение 10^{-4} с. Температурная неоднородность, из которой в МГД-канале формировался T -слой, создавалась на входе в МГД-канал разрядом конденсаторной батареи. На фиг. 1 при-
9 ПМТФ, № 5, 1980 г.