

ВЗРЫВНОЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Е. И. Биченков, В. А. Лобанов

(Новосибирск)

Описаны эксперименты с размыкающим элементом, способным переключать ток с линейной плотностью до $3 \cdot 10^5$ А/см за 5 мкс. Предложено использовать этот элемент во взрывомагнитных генераторах с перестраиваемой индуктивностью накопителя.

1. Плотность энергии, запасаемой в магнитном поле созданных в последние годы индуктивных накопителей, на несколько порядков превышает плотность энергии емкостных накопителей, что открывает большие перспективы использования индуктивных накопителей в экспериментальной физике. Наибольшие запасы энергии достигнуты в стационарных сверхпроводящих накопителях [1] и в импульсных накопителях, запитываемых от взрывомагнитных генераторов (ВМГ), работающих по принципу быстрого сжатия магнитного потока [2, 3]. В последнем случае накопитель имеет небольшую индуктивность (1 - 20 нГ), но ток в нем достигает огромных величин (до $3 \cdot 10^8$ А).

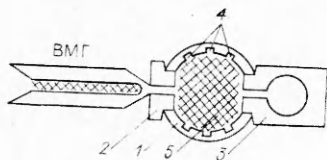
Использование энергии, запасенной в магнитном поле, производится размыканием тока в цепи накопителя и включением в цепь нагрузки. Для этого используются переключатели на основе электрического взрыва тонких проводников [4] или на основе механического разрушения массивных проводников зарядом ВВ [5-7]. При этом эффективность передачи энергии в нагрузку зависит от активного сопротивления нагрузки и отношения индуктивностей накопителя и нагрузки. Малоиндуктивные накопители могут хорошо работать лишь с нагрузками малой индуктивности, а включение больших токов на заметную активную нагрузку приводит к возникновению очень высоких напряжений. Отмеченные особенности передачи энергии из индуктивного накопителя затрудняют использование ВМГ в качестве источника тока для целого ряда экспериментов.

Для уменьшения тока, передаваемого в нагрузку, и увеличения индуктивности накопителя была предложена и экспериментально опробована схема ВМГ с перестраиваемой индуктивностью накопителя [8]. Суть ее сводится к тому, что первоначально накопитель представляет собой N параллельно соединенных витков, которые затем переключаются последовательно. При этом первоначальная индуктивность накопителя мала, и он эффективно работает с ВМГ, запасая энергию. После переключения витков ток в накопителе уменьшается в N раз, а индуктивность его возрастает в N^2 раз. Такая схема позволяет, перестроив индуктивность накопителя, согласовать его практически с любой нагрузкой.

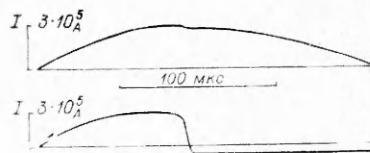
Целью настоящей работы являлись разработка и экспериментальное определение времени срабатывания и максимальной линейной плотности тока, размыкаемого отдельным элементом переключателя, применительно к плоским взрывомагнитным генераторам с перестраиваемой индуктивностью накопителя. Поскольку плоские ВМГ удовлетворительно работают при токе $I \approx 5 \cdot 10^5$ А/см, необходимо, чтобы каждый элемент переключателя

теля размыкал ток порядка этой величины. В противном случае переключатель окажется слишком громоздким и трудно управляемым из-за большого числа параллельно включенных элементов.

2. Особенности компоновки отдельных частей плоских взрывомагнитных генераторов (фиг. 1) определяют место расположения переключателя.



Ф и г. 1



Ф и г. 2

теля. Размыкающий элемент состоял из отрезков металлического кольца (1) высотой 12 мм, с толщиной стенки 5 мм и внутренним диаметром 80 мм, которые с одной стороны крепились к токоподводящим шинам (2), с другой — к витку накопителя (3). В стенках кольца были сделаны пазы (4) шириной 5 мм и глубиной 4 мм, способствовавшие ускоренному разрыву кольца в этих местах. Внутри кольца помещался заряд ВВ (5) толщиной 5 мм. В экспериментах предусматривалось, чтобы при подрыве заряда источник тока шунтировался раньше, чем происходило размыкание тока разрывающимися стенками кольца.

Из фиг. 1 ясно, что размыкающий элемент должен иметь минимальную индуктивность L_1 , поскольку энергия U_1 , запасаемая в нем

$$U_1 = U_0 \frac{L_1}{L_1 + L_2},$$

неизбежно теряется при размыкании и в дальнейшем не может быть использована. Здесь U_0 — начальная энергия, переданная источником в переключатель и накопитель с индуктивностью L_2 . В экспериментах для уменьшения индуктивности размыкающего элемента использовались боковые металлические накладки, вытеснявшие магнитное поле из части объема кольца.

Схема постановки экспериментов соответствовала схеме на фиг. 1 с той разницей, что вместо взрывомагнитного генератора для получения сильных импульсных токов использовалась конденсаторная батарея емкостью $C \approx 10^{-2}$ Ф и напряжением до 5 кв. Батарея конденсаторов разряжалась на размыкатель, соединенный с витком накопителя. В момент максимума тока в цепи подрывался заряд ВВ, который шунтировал разрядную цепь батареи, а затем размыкал ток в цепи витка накопителя.

В экспериментах измерялся ток в цепи батареи и в витке накопителя. Сигналы двух индуктивных датчиков, размещенных в витке соленоида и перед размыкателем, через интегрирующие RC-цепочки подавались на усилители осциллографа ОК-17М. Осциллограмма одного из опытов приведена на фиг. 2. Верхний луч — ток в цепи батареи, нижний — ток в витке накопителя. Проведенные измерения позволили установить, что шунтирование источника тока осуществляется надежно и на дальнейшие процессы в цепи размыкателя батарея не оказывает никакого влияния. Наблюдалось совпадение (в пределах точности измерений) времени разряда батареи с шунтированием цепи и без шунтирования размыкателя.

Результаты экспериментов показали, что при токе в цепи $I \approx 4 \cdot 10^5$ А происходит неконтролируемое размыкание тока в некоторый момент времени, близкий к моменту максимума тока. Время размыкания тока составляло $18 \div 25$ мкс. Возможно это случилось из-за того, что под действием

магнитного давления ($B \approx 3 \cdot 10^5$ Гс $P = B^2/8\pi \approx 4 \cdot 10^3$ атм) в одном из пазов наступал разрыв кольца и возникала электрическая дуга, способная вызвать горение и детонацию ВВ задолго до подрыва детонатора. Детонация ВВ сопровождается высокоскоростным разлетом продуктов взрыва, способных сдуть дугу и разомкнуть ток [6].

С уменьшением тока до $I \approx 10^5$ А размыкание начиналось в заданное время и происходило за 5 мкс. Увеличение тока в два раза приводило к возрастанию времени размыкания до 50 мкс. Начало работы размыкателя совпадало с подрывом ВВ от детонатора. Поскольку разрыв сильных токов в индуктивных цепях сопровождается возникновением высоких напряжений, увеличение времени размыкания естественно связать с возможными пробоями и появлением электрических дуг в местах разрушения кольца.

Для последующих экспериментов размыкатель был усовершенствован. С наружной стороны напротив пазов к кольцу крепились медные пластины толщиной 3 мм для предотвращения разрыва цепи под действием магнитного давления. Если разрыв кольца проводить в инертной среде с высокой электрической прочностью, то можно избежать образования сильноточных дуг, препятствующих быстрому размыканию тока. С этой целью в предполагаемых местах разрушения кольца впереди летящих элементов подрывался вспомогательный заряд ВВ и создавалась атмосфера из продуктов взрыва, имеющих низкую электропроводность. В такой постановке экспериментов удалось разомкнуть ток $I \approx 3 \cdot 10^5$ А за 5 мкс.

Поскольку полученные параметры размыкающего элемента близки к оптимальному режиму работы плоских ВМГ, то, по-видимому, на его основе можно разрабатывать взрывомагнитные генераторы с перестраиваемой индуктивностью накопителя и значительно расширить возможности использования взрывных генераторов.

Авторы благодарны П. И. Зубкову за ценные дискуссии и советы.

Поступила 14 VI 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. Wong J., Fairbanks D. F., Randall R. N., Larson W. L. Fully stabilized superconducting strip for the Argonne and Brookhaven bubble chambers. J. Appl. Phys., 1968, vol. 39, No. 6, p. 2518.
2. Сахаров А. Д., Людаев Р. З., Смирнов Е. Н., Плющев Ю. И., Павловский А. И., Чернышев В. К., Феоктисова Е. А., Жаринов Е. И., Зыкин А. Ю. Магнитная кумуляция. Докл. АН СССР, 1965, т. 165, № 1, стр. 65.
3. Shearer J. W., Abraham F. F., Aplin C. M., Benham B. P., Faulkner J. E., Ford F. C., Hill M. M., McDonald C. A., Stephens W. H., Steinberg D. J., Wilson J. R. Explosive-driven magnetic-field compression generators. J. Appl. Phys. 1968, vol. 39, No. 4, p. 2102.
4. Crawford J. C., Damerov R. A. Explosively driven high-energy generators. J. Appl. Phys., 1968, vol. 39, No. 11, p. 5224.
5. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М., «Мир», 1972.
6. Зубков П. И., Лукьянчиков Л. А. Выключение сильноточных цепей с помощью взрывчатых веществ. ФГВ, 1973, т. 9, № 3, стр. 453.
7. Войтенко А. Е., Жеребенко В. И., Захаренко И. Д., Исаков В. П., Фалеев В. А. Размыкание электрического тока взрывом. ФГВ, 1974, т. 10, № 1, стр. 145.
8. Биченков Е. И., Лобанов В. А. Взрывомагнитный генератор с перестраиваемой индуктивностью накопителя. В сб. «Динамика сплошной среды». Ин-т гидродинамики СО АН СССР, Новосибирск, 1973, вып. 13, стр. 140.