

## ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО КОММУТАЦИИ ТОКА ИНДУКТИВНОГО НАКОПИТЕЛЯ

В. Г. Белан, С. Т. Дурманов  
(Москва)

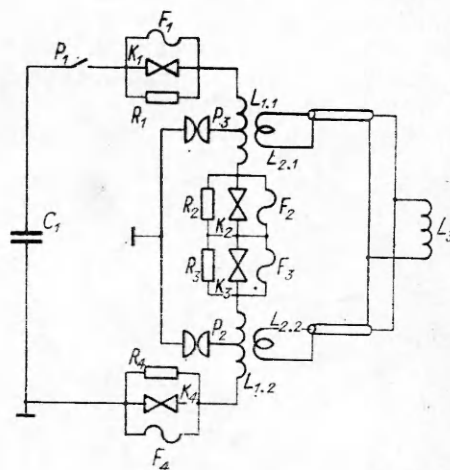
В последнее время большой интерес представляет возможность применения индуктивных накопителей для систем типа  $\Theta$ -пинч с лайнером. Особенностью работы накопителя в этом случае является малая индуктивность соленоида с лайнером на стадии коммутации тока, что позволяет проводить переключения со сравнительно небольшими потерями энергии.

Одной из наиболее сложных проблем при этом, как известно, является размыкание тока [1, 2]. В данной работе дается описание индуктивного накопителя с трансформаторным выводом энергии, который может быть применен для сжатия лайнера, и обсуждаются результаты исследования процессов переключения тока. Проведенные экспериментальные исследования могут быть полезны при создании больших систем на основе индуктивных накопителей.

**Экспериментальная установка.** Установка (фиг. 1) представляет собой двухсекционный индуктивный накопитель ( $L_{1.1}$ ,  $L_{1.2}$ ). Каждая секция состоит из 33 витков диаметром 660 мм, выполненных из алюминиевой шины сечением  $30 \times 30$  мм<sup>2</sup> и включенных последовательно. Секции имеют средний вывод, который через разрядники  $P_2$ ,  $P_3$  соединяется с земляной шиной. Разрядники настроены на пробивное напряжение  $\approx 5,5$  кВ и служат для предотвращения перенапряжений на выводах обмоток, возникающих в случае несрабатывания или аварийного пробоя одного или нескольких размыкателей. Блоки размыкателей (по два на каждую обмотку) включены последовательно с секциями. Суммарная индуктивность первичной обмотки накопителя составляет  $5 \cdot 10^{-4}$  Г. Питание накопителя осуществляется током разряда конденсаторной батареи  $C_1$  с полным энергозапасом 1,2 МДж, при максимальном напряжении 5 кВ. Максимальный зарядный ток накопителя  $\approx 60$  кА, что соответствует энергии  $\approx 1$  МДж. Подключение конденсаторной батареи к накопителю проводится с помощью механического замыкателя  $P_1$  с твердым диэлектриком.

Вывод энергии на нагрузку проводится по трансформаторной схеме с параллельным включением витков вторичной обмотки. Вторичная обмотка состоит из двух витков  $\varnothing 690$  мм и длиной  $10^3$  мм, каждый из которых охватывает одну секцию. Витки выполнены из стали Ст. 3 толщиной 8 мм с коллектором для подключения кабелей. Ток вторичной обмотки (после размыкания первичной цепи) поступает по кабельному фидеру к нагрузке. Ускоряющий соленоид стальной, одновитковый, с внутренним диаметром 150 мм и длиной 120 мм. Поскольку в данных экспериментах изучались только вопросы коммутации тока, то вместо лайнера в соленоид была помещена металлическая вставка  $\varnothing 148$  мм.

Работа накопителя происходит следующим образом: после срабатывания замыкателя  $P_1$  (фиг. 1) начинается процесс зарядки. При достижении необходимой величины тока срабатывают размыкатели  $K_1 - K_4$  и



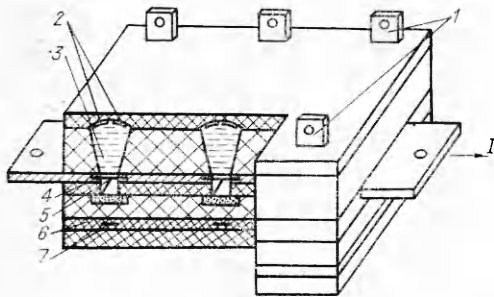
Фиг. 1

ток перебрасывается в проволочки  $F_1-F_4$ , которые, взрываясь, размыкают цепь первичной обмотки, при этом во вторичной цепи появляется умноженный ток. Для выравнивания напряжения на разрывах к каждому размыкателю подключено секционированное сопротивление  $R_1-R_4 = 3 \text{ Ом}$  таким образом, что каждый разрыв шунтировался сопротивлением  $1 \text{ Ом}$ .

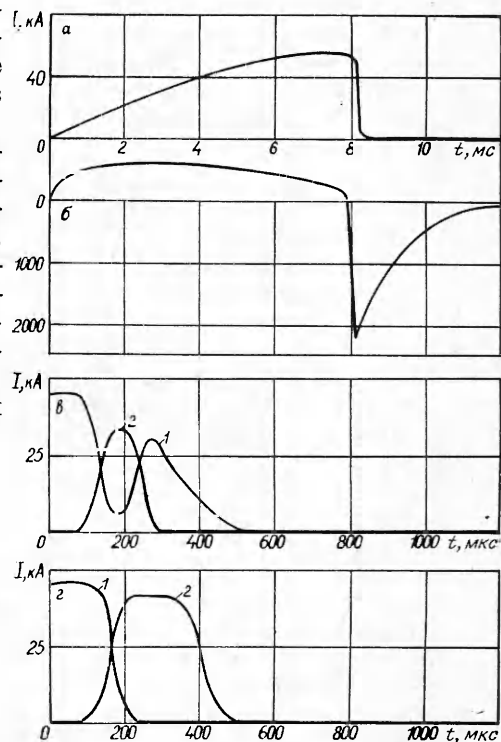
Обмотки накопителя выполнены так, что для зарядного импульса выполнялось условие  $\tau_1 \gg \tau_n \gg \tau_2$ , где  $\tau_1, \tau_2$  — соответственно время затухания тока в первичной и вторичной обмотках,  $\tau_n$  — длительность зарядного импульса. Магнитная энергия, запасенная внутри первичной обмотки,  $E_0 = L_0 I_0^2 / 2$ , где  $L_0 = L_{1.1} + L_{1.2}$ ,  $I_0$  — зарядный ток.

Размыкатель, устройство которого приведено на фиг. 2, выполнен в корпусе из стеклотекстолита. В эксперименте использовалось 4 одновременно срабатывающих размыкателя, каждый из которых имел по 3 разрыва. В качестве дугогасящего диэлектрика во всех экспериментах использовался технический вазелин 3 (фиг. 2), заливаемый в горячем состоянии. Разрушение токопроводов 5 происходило потоком вазелина, истекающего под действием взрыва алюминиевых фольг 2 толщиной  $3 \cdot 10^{-2} \text{ мм}$ , шириной  $7 \text{ мм}$ , длиной  $100 \text{ мм}$  (по две на каждый разрыв). В местах разрывов токопровод выполнялся из алюминиевой фольги толщиной  $0,4 \text{ мм}$ . Ширина каждого разрыва  $10 \text{ мм}$ . В качестве источника энергии для питания фольг привода использовалась конденсаторная батарея  $C = 90 \text{ мкФ}$ ,  $U = 28 \text{ кВ}$ , которая подключалась к выводам 1. Для обеспечения синхронности срабатывания всех размыкателей включение конденсаторов привода осуществлялось общим разрядником. С целью предотвращения эрозии ножей 4 после разрушения фольги токопровода каждый разрыв зашунтировался медной проволочкой диаметром  $0,5-1,5 \text{ мм}$ , помещенной в кварцевый песок, или медной фольгой 7 в стеклоткани 6, которые позволяют понизить напряжение на разрыве в момент разрушения токопровода и играют роль поглотителя энергии, выделяемой при перебро-се тока во вторичную обмотку. Сечение проводников выбиралось исходя из величины размыкаемого тока.

Результаты экспериментов и обсуждение. Исследование работы системы коммутации проводилось в основном при зарядных токах до  $55 \text{ кА}$ . На фиг. 3, а, б представлены осциллограммы зарядного тока и тока вторичной обмотки накопителя соответственно (емкость накопительной батареи  $C_1 = 6 \cdot 10^{-2} \text{ Ф}$ ,  $U = 5 \cdot 10^3 \text{ В}$ ). Наличие небольшого тока в цепи



Ф и г. 2



Ф и г. 3

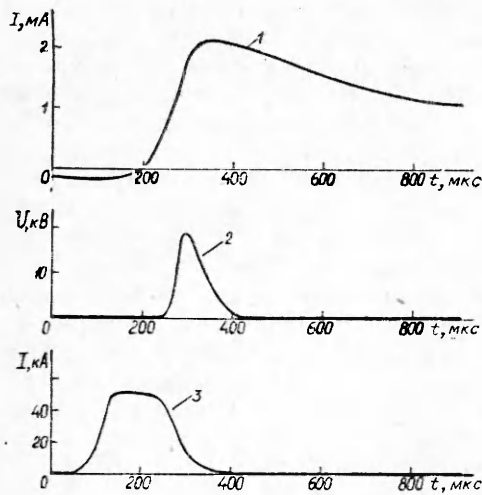
вторичной обмотки в процессе заряда обусловлено трансформацией тока вследствие хотя и малой, но конечной величины отношения  $\tau_2/\tau_n$ .

Одним из необходимых условий работы системы является малый разброс в разрыве тока всеми размыкателями. Как уже отмечено, для этой цели включение привода осуществлялось через один разрядник. Кроме того, разрядные цепи всех фольг привода были выполнены по возможности одинаковыми. Большое значение имеет качество заливки диэлектрика, так как наличие воздушных пузырьков под фольгами приводит к резкому увеличению объема паров после взрыва, снижает их давление и соответственно уменьшает скорость течения диэлектрика. По этой причине фольги привода выполнялись из отдельных узких полосок, что позволяет уменьшить возможность появления воздушных полостей. В экспериментах, где использовались широкие фольги (до 23 мм шириной и сечением 0,42 мм<sup>2</sup>), мы наблюдали пробой в размыкателях, вызванные разбросом срабатывания. Как следует из измерений, размыкатели с узкими фольгами привода срабатывают с разбросом не более 10 мкс, что много меньше времени переключения тока и не вызывает перенапряжений на разрывах. Большое внимание было уделено подбору размеров шунтирующих проволочек. Проволочка должна иметь достаточно малое начальное сопротивление, чтобы обеспечить перехват тока размыкателя. Масса выбирается такой, чтобы обеспечить поглощение энергии (энергии потерь на коммутацию), которая выделяется при перебросе тока во вторичную обмотку. Длина проволочки подбирается из условия необходимой электрической прочности продуктов взрыва.

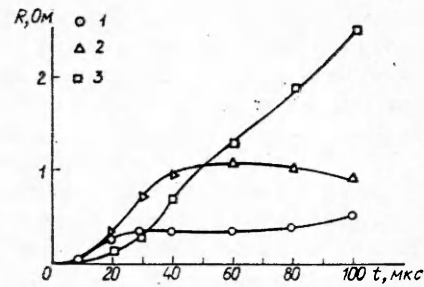
В случае, когда сечение проволочки мало и не соответствует переключаемому току, одновременно с процессом гашения дуги в размыкателе происходит ее разогрев. Сопротивление проволочки возрастает, и в результате часть тока продолжает протекать через размыкатель. На фиг. 3, в представлены осциллограммы такого эксперимента (*1* — ток размыкателя, *2* — ток шунтирующей проволочки), где были установлены медные проволочки  $\varnothing$  1,04 мм. После испарения проволочки проводимость ее падает, а в размыкателе наблюдается возрастание тока. Хотя в дальнейшем дуга гасится потоком диэлектрика, процесс переключения происходит медленно ( $\tau_p \approx 300$  мкс) и, кроме того, в размыкателях выделяется значительная энергия, что вызывает эрозию ножей. Экспериментально было найдено, что при зарядном токе 45—50 кА диаметр проволочки должен быть 1,5 мм. В этом случае проволочка остается холодной в течение всего времени переброса ( $\approx 80$  мкс) и полностью перехватывает ток размыкателя. Дальнейший разогрев проволочки и связанный с ним рост напряжения уже не вызывают тока в размыкателе (фиг. 3, в). Время замыкания тока в первичной цепи определяется в основном процессами разогрева и испарения проволочки. Как видно из эксперимента, при зарядном токе 45 кА и медной проволочке  $\varnothing$  1,5 мм оно оказывается  $\approx 80$  мкс.

Взрывающиеся в кварцевом песке медные проволочки выдерживали напряжение до 400—450 В/см. Более высокие предельные напряжения (до 600—650 В/см) достигались при использовании взрыва фольг в стеклоткани [3]. Такое устройство шунтирующего элемента, кроме того, менее трудоемко при сборке. Медная фольга длиной 420 мм, толщиной  $7 \times 10^{-2}$  мм и шириной до 30 мм помещалась между двумя слоями стеклоткани и зажималась под нижней плитой размыкателя (см. фиг. 2). Эта конструкция позволила снизить индуктивность цепи шунтирующего элемента, и в результате время переброса тока на фольгу уменьшилось до 40—50 мкс (фиг. 4). Поэтому в большинстве экспериментов размыкатели шунтировались фольгами.

По результатам измерения напряжения и тока найдена зависимость изменения сопротивления фольги от времени. Соответствующие кривые для различных сечений фольг представлены на фиг. 5. За начало отсчета



Ф и г. 4



Ф и г. 5

кривых, видимо, объясняется несоответствием между массой фольги и энергией, выделяемой при переключении тока во вторичную обмотку. В результате избыток энергии выделяется в дуговом разряде, возникающем внутри пакета и снижающем сопротивление. При осмотре пакетов с фольгами после эксперимента в канале взрыва видны продольные разрывы, вызванные дугой, и чем меньше сечение фольги, тем более сильные повреждения. В случае фольги шириной 30 мм и при зарядном токе 54 кА взрывной канал после эксперимента представлял собой однородную спекшуюся массу паров меди и стекловолокна. Сопротивление такой фольги почти линейно растет до конца стадии переключения (фиг. 5, где  $I_0 = 54$  кА, ширина фольги 23; 26 и 30 мм — точки 1—3 соответственно).

Для анализа потерь энергии на коммутацию схема на фиг. 1 может быть представлена эквивалентной ей схемой с последовательным включением индуктивностей  $L_0$  и  $L_H$ , где  $L_H = N^2(L_{2.1} + L_{2.2} + 4L_3) - L_0$ . Здесь  $L_{2.1}$ ,  $L_{2.2}$  — индуктивности секций вторичной обмотки,  $L_3$  — индуктивность соленоида,  $N$  — отношение числа витков первичной и вторичной обмоток каждой секции. Коммутирующие устройства в такой схеме будут включены параллельно  $L_H$ . Первоначально ток в цепи  $L_H$  отсутствует. Тогда потери энергии на коммутацию для момента времени, когда ток  $I_2$  максимален, могут быть вычислены из выражения [2]

$$(1) \quad \Delta E = E_0 L_H / (L_0 + L_H).$$

При этом предполагается, что магнитный поток в системе сохраняется. Ожидаемое значение потерь, вычисленное по приведенной формуле, должно быть  $\approx 20\%$ , что соответствует  $L_H \approx 1,2 \cdot 10^{-4}$  Г.

В эксперименте потери могут быть определены из баланса энергии в накопителе. Хотя точность такого метода невысока, однако из измерений следует, что наблюдаемые потери несколько больше, чем вычисленные из выражения (1), и, видимо, объясняются дополнительными потерями за счет «вмораживания» поля в металл первичной обмотки (время диффузии велико по сравнению с  $\tau_p$ ), а также потерями из-за несохранения магнитного потока.

На фиг. 4 представлены зависимости тока вторичной обмотки  $I_2$ , напряжения на размыкателе и тока шунтирующей фольги (кривые 1—3 соответственно). Напряжения на размыкателях появляется в момент ин-

времени принят момент уменьшения тока по фольге. Как видно, при малых сечениях сопротивление после некоторого роста выходит на плато и остается примерно постоянным почти до конца стадии переключения. Такой ход

тенсивного роста сопротивления фольги и возрастает до величины 20 кВ на каждом размыкателе.

При зарядном токе 54 кА амплитуда тока на выходе накопителя более 2 МА. После достижения максимума ток экспоненциально спадает с постоянной времени  $\tau_2 \approx 10^{-3}$  с.

Авторы выражают благодарность И. А. Иванову за интерес к работе, В. И. Курносовой, К. В. Соломасову за помощь в проведении экспериментов.

Поступила 13 X 1980

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Азизов Э. А., Ахмеров Н. А. и др. Коммутационные характеристики взрывных размыкателей с быстрым разрушением контактного элемента.— ПМТФ, 1978, № 4.
2. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972.
3. Азизов Э. А., Кочуров И. В., Степаненко М. М. Квазистационарное ускорение плазмы в коаксиальном инжекторе с нецилиндрическими электродами, питаемом от индуктивного накопителя энергии.— ЖТФ, 1975, т. 45, вып. 9.

УДК 622 235

#### КАМУФЛЕТНЫЙ ВЗРЫВ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

А. Н. Бовт, К. В. Мясников,  
В. Н. Николаевский, Е. А. Шурыгин  
(Москва)

1. К настоящему времени экспериментально изучено механическое воздействие камуфлетного взрыва на монолитную горную породу [1—5], причем не только найдены зависимости максимальных параметров взрывной волны (массовой скорости, давления) от приведенного расстояния, но и имеются определенные сведения о зонах разрушения. Эти представления позволили сформулировать относительно простые способы прогнозирования механического воздействия взрыва на монолитную горную породу [1, 5]. Вместе с тем экспериментальные данные по взрыву в пористых средах ограничиваются результатами лабораторных работ [6, 7] с песком и полевых работ [8, 9] с натурными мягкими грунтами, что позволило изучить характер затухания амплитуд волн сжатия [6, 8, 9], а также зафронтальное разуплотняющее движение [7], обусловленное эффектом дилатансии [1, 5, 10]. Изучение зон разрушения на таком материале, как песок, крайне затруднительно (см., например, [11]). В лабораторных опытах [3, 12] с пресованной каменной солью основное внимание также уделялось закономерности затухания массовых скоростей в волне сжатия.

Сопоставление имеющихся данных по взрывным сферическим волнам приводит к следующему противоречию. Так, часто утверждают, что зависимость максимальных массовых скоростей для монолитных горных пород (гранит, каменная соль) от приведенного расстояния ( $\bar{r} = R/W^{1/3}$ , где  $W$  — энергия взрыва) такая же, как и для такой пористой среды, как песок. С другой стороны, известен вывод о значительной низкой сейсмической эффективности некоторых пористых сред (аллювий), вмещающих очаг взрыва [1, 13].

В связи с этим представляет значительный интерес изучить механический эффект взрыва на прочную высокопористую среду, области разрушения в которой достаточно просто фиксировать. За счет искусственного изготовления удастся так подобрать ее свойства, чтобы она моделировала реальные горные породы, а также разместить измерительные устройства без нарушения ее целостности.

2. Опыты по камуфлетному взрыву проводились в блоках из искусственной пористой среды, которая изготовлялась из смеси песка марки КП-3, известковой муки и жидкого стекла. За счет термообработки пористая среда стала подобной прочной хрупко-разрушаемой горной породе.