

$= 0,75 \cdot 10^{-3}$  Ом·м,  $aj_0 = 3 \cdot 10^4$  В,  $u_m/(aj_0) = 33,3$ ,  $W_H/W_H \cong k^2/2 = 0,32$ ,  $W_H \cong 3 \cdot 10^6$  Дж,  $W_H/W_6 = 60$ ,  $L_1 = 4,4 \cdot 10^{-8}$  Г,  $L_B/L_1 \cong 0,05$ ,  $T/\tau = \ln 60 = 4,1$ ,  $\sqrt{L_2/L_1} = 56,6$ ,  $L_2 = 1,41 \cdot 10^{-4}$  Г,  $\tau = 1,41 \cdot 10^{-5}$  с,  $T = 57,7 \cdot 10^{-6}$  с,  $l_r = 0,43$  м,  $y_0/a = 0,74$ ,  $y_0 = 5,5 \cdot 10^{-3}$  м,  $y_m = 0,33$  м.

Таким образом, взрывомагнитный генератор имеет экспоненциальный профиль с начальной ординатой  $y_0 = 5,5 \cdot 10^{-3}$  м, конечной ординатой  $y_m = 0,33$  м, длиной  $l_r = 0,43$  м. Согласующий трансформатор имеет коэффициент трансформации  $n \cong 57$ , что соответствует  $w_1 = 1$ ,  $w_2 = 57$ . Индуктивность первичной обмотки  $L_1 = 4,4 \cdot 10^{-8}$  Г. Батарея накачки с энергией  $5 \cdot 10^4$  Дж должна давать ток  $I_{10} = 2,2 \cdot 10^5$  А.

Поступила 12 VIII 1977

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Герасимов Л. С. Согласование взрывомагнитного генератора с индуктивной нагрузкой. — ЖТФ, 1974, т. 44, № 9.
2. Биченков Е. И. Усиление тока и увеличение энергии в плоских магнитно-кумулятивных генераторах с диффузией потока. — ПМТФ, 1976, № 4.
3. Азаркевич Е. И., Войтенко А. Е., Исаков В. П., Котов Ю. А. Взрывной электрический генератор. — ЖТФ, 1976, т. 46, № 9.
4. Conger R. L. Large electric power pulses by explosive magnetic-field compression. — «J. Appl. Phys.», 1967, vol. 38.
5. Биченков Е. И., Войтенко А. Е., Лобанов В. А., Маточкин Е. П. Схема расчета и включение на нагрузку плоских взрывомагнитных генераторов. — ПМТФ, 1973, № 2.
6. Войтенко А. Е., Маточкин Е. П., Яблочников Б. А. Использование взрывомагнитного генератора для питания газового разряда. — ПТЭ, 1973, № 3.
7. Герасимов Л. С., Икрянников В. И. Работа плоского взрывомагнитного генератора на активную нагрузку. — ЖТФ, 1977, т. 47, № 12.

УДК 538.4 : 621.31

### ВЫВОД ЭНЕРГИИ ИЗ ИНДУКТИВНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ И ВЗРЫВОМАГНИТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ В ИНДУКТИВНУЮ НАГРУЗКУ С ПОМОЩЬЮ РАЗРЫВА КОНТУРА

В. А. Демидов, Е. И. Жаринов, С. А. Казаков,  
В. К. Чернышев

(Москва)

В последние годы вопросу получения мощных импульсов тока с помощью индуктивных накопителей энергии уделяется все большее внимание. Повышенный интерес к таким устройствам вызван тем обстоятельством, что плотность магнитной энергии в индуктивных накопителях значительно превышает плотность энергии емкостных источников. Наиболее наглядно эти преимущества проявляются в импульсных накопителях, запитываемых от взрывомагнитных генераторов (ВМГ), работающих на принципе быстрого сжатия магнитного потока [1—5]. Во взрывных системах накопитель имеет небольшую индуктивность, но токи в нем могут достигать десятков и даже сотен миллионов ампер.

Получение с помощью ВМГ рекордных величин токов и энергий открывает широкие перспективы использования импульсных накопителей во многих областях современной физики (изучение плазменного фокуса [6], получение больших магнитных давлений для изэнтропического сжатия веществ [7], ускорение заряженных частиц до высоких энергий и т. п.).

Наиболее распространенный способ вывода энергии из индуктивного накопителя во внешнюю нагрузку заключается в размыкании тока в цепи накопителя. Для этого используются коммутаторы на основе электрического взрыва тонких проводников [4, 8, 9] или на основе механического разрушения проводников зарядом ВВ [5, 10]. Эффективность передачи энергии в нагрузку зависит от активного сопротивления, вводимого коммутатором в цепь разрыва, и отношения индуктивностей накопителя и нагрузки. Как отмечалось в работе [8], важное влияние на характер передачи энергии в нагрузку оказывает паразитная индуктивность коммутатора.

Использование в качестве индуктивных накопителей взрывомагнитных генераторов, являющихся одновременно и усилителями начальной энергии, потребовало наряду с экспериментальными исследованиями теоретически обоснованного подхода к выбору основных элементов контура согласования параметров генератора с нагрузкой для формирования в последней мощных импульсов тока.

Цель данной работы — рассмотрение процесса вывода энергии из стационарных индуктивных накопителей и взрывомагнитных генераторов во внешнюю индуктивную нагрузку с учетом паразитной индуктивности коммутатора, определение оптимальных соотношений между индуктивностями основного контура и нагрузки с целью получения в ней максимальной энергии.

**1. Эффективность передачи энергии из индуктивного накопителя в индуктивную нагрузку с учетом паразитной индуктивности коммутатора.** Как показано в работе [8], при наличии в коммутаторе паразитной индуктивности часть начальной энергии поглощается самим коммутатором, что приводит к уменьшению общего КПД системы. Также известно [5], что максимальный коэффициент передачи энергии в нагрузку, составляющий 25% от начальной при безындуктивном коммутаторе, достигается при условии, когда индуктивность накопителя равна индуктивности нагрузки. Наличие в коммутаторе паразитной индуктивности, величина которой зависит от конструктивных особенностей самого разрывного устройства, приводит к изменению условий оптимальной передачи энергии в нагрузку.

Определим, при какой индуктивности  $L_1$  накопителя и заданных постоянных индуктивностях нагрузки  $L_2$  и коммутатора  $L_3$  в нагрузке достигается максимальный коэффициент передачи энергии.

Рассмотрим эквивалентную электрическую схему, представленную на фиг. 1, полагаем, что в момент времени  $t = 0$  ключ  $K$  подсоединяет нагрузку  $L_2$  к основному контуру  $L_1$ , и в этот момент коммутатор производит разрыв электрического контура с индуктивностью  $L_1 + L_3$ . Считаем, что в момент разрыва сопротивление  $R$  возрастает скачком от нуля до бесконечности.

Поскольку начальный магнитный поток задан и равен  $\Phi_0$ , то можно записать

$$\Phi_0 = I_1(L_1 + L_3).$$

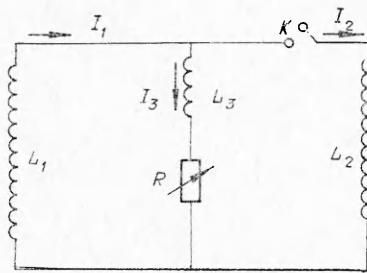
Отсюда токи в накопителе и нагрузке равны

$$I_1 = \Phi_0 / (L_1 + L_3), \quad I_2 = \Phi_0 L_1 / (L_1 + L_3)(L_1 + L_2).$$

Начальная энергия и энергия, передаваемая в нагрузку, будут определяться

$$W_0 = \Phi_0^2 / 2 (L_1 + L_3), \quad W_2 = \Phi_0^2 L_1^2 L_2 / 2 (L_1 + L_3)^2 (L_1 + L_2)^2.$$

Следовательно, коэффициент передачи энергии в нагрузку можно пред-



Фиг. 1

означает, что существует оптимальная величина индуктивности  $L_1$ , когда должен достигаться максимальный коэффициент передачи энергии в нагрузку. На фиг. 2 представлено семейство кривых  $k(\alpha)$  для разных значений  $\beta$ , характеризующих собой степень влияния паразитной индуктивности коммутатора на энергию в нагрузке. Для случая  $\beta = 0$  (коммутатор безиндуктивный) максимальный коэффициент передачи энергии достигается при равенстве  $L_1 = L_2$  и, как указывалось ранее, составляет 0,25. С ростом  $\beta$  коэффициент передачи энергии снижается, при этом максимум  $k$  смещается в сторону более высоких значений  $\alpha$ . Это явление имеет простое физическое объяснение.

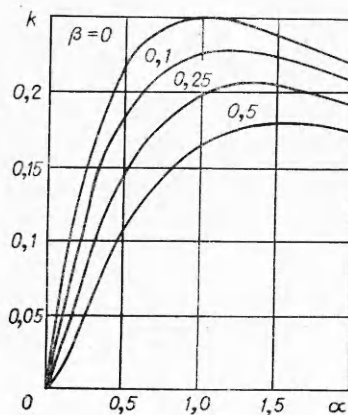
Коммутаторы, обладающие сравнительно большой паразитной индуктивностью, заключают в себе заметную долю начальной энергии, запасенной в контуре накопителя. Эта часть энергии в процессе разрыва в нагрузку не передается, а рассеивается на сопротивлении  $R$ . В предельном случае, когда  $L_3 \rightarrow \infty$ , вся начальная энергия переходит в джоулево тепло.

Для определения оптимальной величины  $L_1$  продифференцируем (1.1) по  $\alpha$  и полученное выражение приравняем нулю. Из квадратного уравнения вида  $\alpha^2 - \alpha - 2\beta = 0$  находим

$$\alpha_* = 1/2 + \sqrt{1/4 + 2\beta}.$$

Зависимость  $\alpha_*(\beta)$  представлена на фиг. 3. При известной индуктивности коммутатора эта зависимость позволяет установить оптимальную индуктивность накопителя, при которой в нагрузочной индуктивности достигается максимальная энергия.

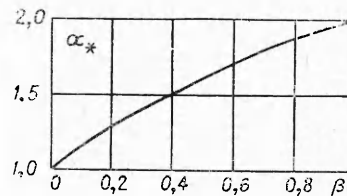
## 2. Эффективность передачи энергии из ВМГ в индуктивную нагрузку с учетом паразитной индуктивности коммутатора и потерь магнитного



ставить в виде

$$(1.1) \quad k = \frac{W_2}{W_0} = \frac{1}{\left(1 + \frac{L_2}{L_1}\right)^2 \left(\frac{L_1}{L_2} + \frac{L_3}{L_2}\right)} = \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)^2 (\alpha + \beta)},$$

где  $\alpha = L_1/L_2$ ,  $\beta = L_3/L_2$  — безразмерные величины. Из (1.1) видно, что при  $L_1 \rightarrow 0$  и  $L_1 \rightarrow \infty$  величина  $k$  стремится к нулю. Физически это



Фиг. 3

Фиг. 2

**потока в процессе сжатия контура.**

Описание принципа работы и конструкций взрывомагнитных генераторов достаточно подробно дано в работах [3—5]. Отличительная особенность ВМГ состоит в том, что в процессе сжатия контура ток и энергия возрастают (если потери магнитного потока сравнительно невелики), тогда как в обычных индуктивных накопителях эти величины сохраняются постоянными. В работе [3] предложено характеризовать эффективность работы ВМГ через коэффициент совершенства системы  $F$ , определяемый как

$$(2.1) \quad F = \ln \frac{I(t)}{I_0} / \ln \frac{L_0}{L(t)},$$

где  $I_0, I(t)$  — начальный ток и ток в контуре в момент  $t$ ;  $L_0, L(t)$  — начальная индуктивность и индуктивность контура в момент  $t$ . Из выражения (2.1) видно, что чем выше  $F$ , тем более совершенной и эффективной является система. Уместно заметить, что усиление энергии в ВМГ происходит при условии  $F > 0,5$ .

Для расчета коэффициента передачи энергии из ВМГ во внешнюю индуктивную нагрузку с учетом коэффициента совершенства  $F$  и паразитной индуктивности коммутатора рассмотрим эквивалентную электрическую схему, представленную на фиг. 4. В этой схеме роль генератора выполняет уменьшающаяся индуктивность  $L_1(t)$ , а нагрузкой служит индуктивность  $L_2$ . Индуктивность коммутатора обозначена через  $L_3$ . Считаем, что в момент разрыва контура сопротивление коммутатора возрастает скачком от нуля до бесконечности. К началу сжатия магнитного потока ( $t = 0$ ) в генераторе с начальной индуктивностью  $L_0$  протекает ток  $I_0$ . Поскольку начальный поток задан и равен  $\Phi_0$ , то поток  $\Phi_1$  к моменту начала разрыва  $t_1$  при уменьшении индуктивности от  $L_0$  до  $L_1(t_1)$  можно представить в виде

$$\Phi_1 = \left( \frac{L_0 + L_3}{L_1 + L_3} \right)^{F-1} \Phi_0,$$

а токи в генераторе и нагрузке будут определяться следующими выражениями:

$$I_1 = \frac{\Phi_1}{L_1 + L_3} = I_0 \left( \frac{L_0 + L_3}{L_1 + L_3} \right)^F, \quad I_2 = \frac{I_1 L_1}{L_1 + L_2} = I_0 \left( \frac{L_0 + L_3}{L_1 + L_3} \right)^F \frac{L_1}{L_1 + L_2}.$$

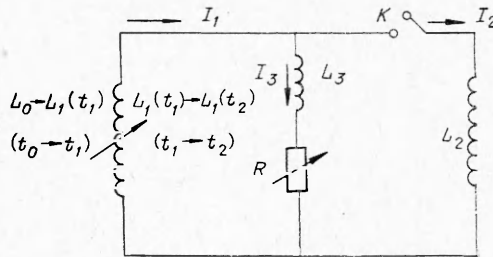
Так как начальная энергия генератора и энергия в нагрузке соответственно равны

$$W_1 = \frac{I_0^2 (L_0 + L_3)}{2} \quad \text{и} \quad W_2 = \frac{I_0^2}{2} \left( \frac{L_0 + L_3}{L_1 + L_3} \right)^{2F} \frac{L_1^2 L_2}{(L_1 + L_2)^2},$$

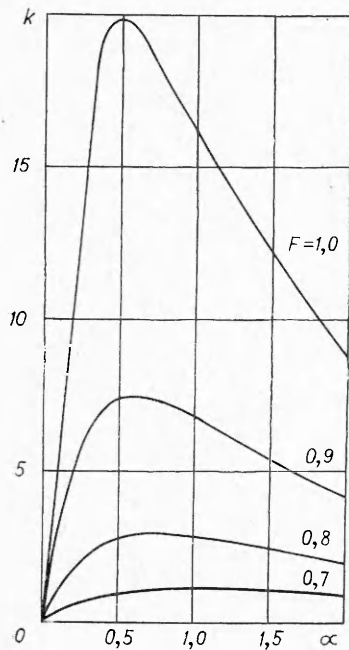
то коэффициент передачи энергии из ВМГ в индуктивную нагрузку запишем в виде

$$(2.2) \quad k_1 = \frac{W_2}{W_1} = (L_0 + L_3)^{2F-1} \frac{I_1^2 I_2}{(L_1 + L_3)^{2F} (L_1 + L_2)^2} = \frac{(d + \beta)^{2F-1}}{(\alpha + \beta)^{2F} \left( 1 + \frac{1}{\alpha} \right)^2},$$

где  $\alpha = L_1/L_2$ ,  $\beta = L_3/L_2$ ,  $d = L_0/L_2$  — безразмерные параметры.



Фиг. 4



Фиг. 5

Если коэффициент совершенства ВМГ составляет  $F = 0,5$  (генератор не усиливает энергию), то (2.2) превращается в формулу (1.1), полученную для коэффициента передачи энергии в нагрузку для стационарных индуктивных накопителей. На фиг. 5 представлено семейство расчетных кривых  $k(\alpha)$  для разных значений  $F$ , характеризующих степень влияния коэффициента совершенства генератора на коэффициент передачи энергии в нагрузку. В качестве начальных параметров в расчете принято  $d = 100$ ,  $\beta = 0,25$ . Зависимости  $k(\alpha)$  имеют явно выраженный максимум, который с уменьшением  $F$  снижается и смещается в сторону больших значений  $\alpha$ . Чем выше эффективность работы ВМГ, тем до меньшей конечной индуктивности надо сжимать контур для получения в нагрузке максимальной энергии. Проведем оптимизацию коэффициента передачи энергии по параметру  $\alpha$ . Для этого выражение (2.2) продифференцируем по  $\alpha$  и полученное соотношение приравняем нулю. После решения квадратного уравнения  $\alpha^2 - \alpha(1/F - 1) - \beta/F = 0$  находим

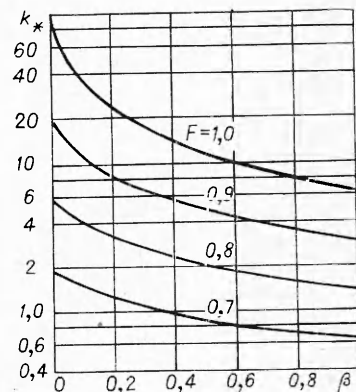
$$(2.3) \quad \alpha_* = \frac{1-F}{2F} + \sqrt{\left(\frac{1-F}{2F}\right)^2 + \frac{\beta}{F}}$$

Подставив (2.3) в (2.2), имеем

$$k_* = \frac{(d + \beta)^{2F-1}}{\left[\beta + \frac{1-F}{2F} + \sqrt{\left(\frac{1-F}{2F}\right)^2 + \frac{\beta}{F}}\right]^{2F} \left[1 + \frac{1}{\frac{1-F}{2F} + \sqrt{\left(\frac{1-F}{2F}\right)^2 + \frac{\beta}{F}}}\right]^2}$$

Семейство расчетных кривых  $k_*(\beta)$  для разных значений  $F$  представлено на фиг. 6. Результаты расчетов наглядно показывают, насколько важную роль играет паразитная индуктивность коммутатора при передаче энергии в нагрузку. Достаточно сказать, что если в случае  $F = 1$ ,  $\beta = 0$  коэффициент передачи энергии составляет  $k_* = 100$ , то при  $F = 1$  и  $\beta = 0,25$  уменьшается в 5 раз.

**3. Вывод энергии из ВМГ в индуктивную нагрузку с учетом эффекта дожатия магнитного потока после разрыва контура.** В обычной схеме ВМГ энергия в нагрузку выводится следующим образом: сначала основной контур генератора деформируется до малой конечной индуктивности, а затем с помощью коммутатора производится разрыв контура и подключение внешней нагрузки. В результате некоторая доля накопленной энергии из конечной индуктивности ВМГ передается в нагрузку.



Фиг. 6

Возможен и другой вариант вывода энергии из ВМГ в нагрузку. Он заключается в том, что разрыв контура производится в более ранний период времени, когда конечная индуктивность деформируемого контура сравнительно большая. После разрыва продолжают деформировать контур и сжимать магнитный поток. В отличие от первой схемы здесь за счет дожатия потока энергия в нагрузке возрастает. Следует сразу же заметить, что прирост энергии в нагрузке за счет дожатия потока после разрыва может быть существенным только в том случае, когда величина интеграла  $\int_0^{\tau} \dot{L}_1(t) dt$  будет сравнима с величиной  $L_1(t_1) + L_2$ , где  $\dot{L}_1(t)$  — скорость вывода индуктивности ВМГ после разрыва;  $\tau$  — заданная длительность импульса тока в нагрузке. Оценим энергетические возможности последнего случая и сравним со схемой передачи энергии без дожатия потока.

Пусть основной контур ВМГ с начальной индуктивностью  $L_0$  (см. фиг. 4) за время  $(t_0 - t_1)$  деформируется до конечной индуктивности  $L_1(t_1)$ . В момент  $t_1$  к нему подключается нагрузка  $L_2$  и производится разрыв контура, в котором омическое сопротивление  $R$  возрастает скачком от нуля до бесконечности. После разрыва сжатие потока продолжается и индуктивность за время  $(t_1 - t_2)$  уменьшается до  $L_1(t_2)$ . Если в момент  $t_0$  начальный поток равен  $\Phi_0$ , то поток  $\Phi_1$  в момент  $t_1$  с учетом потерь будет равен

$$\Phi_1 = \Phi_0 \left( \frac{L_0 + L_3}{L_1(t_1) + L_3} \right)^{F-1},$$

а токи в генераторе и нагрузке соответственно определяются

$$I_1(t_1) = \frac{\Phi_1}{L_1(t_1) + L_3} = I_0 \left( \frac{L_0 + L_3}{L_1(t_1) + L_3} \right)^F,$$

$$I_2(t_1) = \frac{I_1(t_1) L_1(t_1)}{L_1(t_1) + L_2} = I_0 \left( \frac{L_0 + L_3}{L_1(t_1) + L_3} \right)^F \frac{L_1(t_1)}{L_1(t_1) + L_2}.$$

После разрыва ток в нагрузке в момент  $t_2 > t_1$  равен

$$I_2(t_2) = I_0 \left( \frac{L_0 + L_3}{L_1(t_1) + L_3} \right)^F \frac{(L_1(t_1) + L_2)^{F-1} L_1(t_1)}{(L_1(t_2) + L_2)^F}.$$

Коэффициент передачи энергии из ВМГ в нагрузку примет вид

$$(3.1) \quad k_2 = \frac{W_2}{W_0} = \frac{(L_0 + L_3)^{2F-1} L_1^2(t_1) (L_1(t_1) + L_2)^{2(F-1)} L_2}{(L_1(t_1) + L_3)^{2F} (L_1(t_2) + L_2)^{2F}} =$$

$$= \frac{(d + \beta)^{2F-1} \alpha^2 (\alpha + 1)^{2(F-1)}}{(\alpha + \beta)^{2F} (\mu + 1)^{2F}},$$

где  $d = L_0/L_2$ ,  $\alpha = L_1(t_1)/L_2$ ,  $\beta = L_3/L_2$ ,  $\mu = L_1(t_2)/L_2$  — безразмерные величины.

Чтобы установить преимущество системы ВМГ с дожатием потока перед обычной схемой вывода энергии, проведем сравнение коэффициентов передачи энергий. Воспользовавшись формулами (2.2), (3.1), получаем

$$(3.2) \quad \frac{k_2}{k_1} = \frac{(\alpha + 1)^{2F}}{(\mu + 1)^{2F}}.$$

Поскольку  $\alpha > \mu$ , при  $F > 0$   $k_2/k_1 > 1$ . Как видно из (3.2), в энергетическом отношении наибольшее преимущество схемы с дожатием потока

проявляется при сравнительно больших значениях  $\alpha$  и малых  $\mu$ . Практически это означает, что чем раньше производится разрыв контура и чем меньше конечная индуктивность ВМГ, тем большую энергию можно получить в нагрузке.

Поступила 8 VI 1977

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Биченков Е. И. Взрывные генераторы.— «Докл. АН СССР», 1967, т. 174, № 4.
2. Fowler C. M., Garn W. B., Caird R. S. Production of very high magnetic fields by implosion.— «J. Appl. Phys.», 1960, vol. 31, p. 588.
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, N 4, p. 2102.
4. Crawford J. C., Damerov R. A. Explosively driven high-energy generator.— «J. Appl. Phys.», 1968, vol. 39, N 11, p. 5224.
5. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля.— М., «Мир», 1972.
6. Bernard J., Boussinesq J., Morin J., Nazet C., Patou C., Vedel J. An explosive generator-powered plasma focus.— «Phys. Lett.», 1971, vol. 35A, N 4, p. 288.
7. Hawke R. S., Duerre D. E., Huebel J. G., Klapper H., Steinberg D. J., Keeler R. N. Method of isentropically compressing materials to several megabars.— «J. Appl. Phys.», 1972, vol. 43, N 6.
8. Герасимов Л. С., Искольдский А. М., Нестерихин Ю. Е., Пинус В. К. Передача энергии из индуктивного накопителя с помощью электровзрывного размыкателя тока.— ПМТФ, 1975, № 1.
9. Герасимов Л. С., Икрянников В. И., Пинчук А. И. Передача энергии из индуктивного накопителя в индуктивную нагрузку с помощью электровзрывного размыкателя тока.— ПМТФ, 1975, № 1.
10. Войтенко А. Е., Жеребненко В. И., Захаренко И. Д., Исаков В. П., Фалеев В. А. Размыкание электрического тока взрывом.— ФГВ, 1974, т. 10, № 1.

УДК 535.247

#### ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПРИ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ

*С. А. Новиков, В. В. Пермяков, А. И. Рябикин,  
В. А. Синицын*

(Москва)

В практике взрывных исследований при измерении малых перемещений движущейся поверхности имеют место случаи, когда измерительные электрические датчики (типа электроконтактных, емкостных, индуктивных и т. п.) не могут быть установлены на исследуемой поверхности или даже в непосредственной близости к ней, например, в опытах с сильно нагреваемыми образцами, при наличии электромагнитных помех, при необходимости сохранения измерительных устройств в случае разрушения нагружаемых конструкций и т. п. В таких экспериментах может успешно использоваться фотометрический метод, основанный на механической модуляции светового луча, пропускаемого через узкую щель между ис-