

СХЕМЫ ФОРМИРОВАТЕЛЯ ТОКА НА ОСНОВЕ ДИСКОВОГО ВЗРЫВОМАГНИТНОГО ГЕНЕРАТОРА И ВЗРЫВНОГО РАЗМЫКАТЕЛЯ

Сычев Алексей Анатольевич (AASychev@vniief.ru), Власов Юрий Валентинович

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» г. Саров Нижегородской обл.

Одним из способов исследования свойств материалов в диапазоне плотностей и температур, соответствующем физике высоких плотностей энергии, является обработка результатов измерения волновых и массовых скоростей в мишени при ее соударении с ударником, движущимся со скоростью ~10 км/с. Разогнать ударник до такой скорости можно взрывным или электромагнитным способом, последний обладает рядом преимуществ. Для электромагнитного ускорения ударников необходимо использование источников энергии, способных формировать в нагрузке многомегаамперные импульсы тока с микросекундным временем нарастания. Такими выходными характеристиками обладает дисковый взрывомагнитный генератор (ДВМГ) с размыкателем тока. В ДВМГ для обострения импульса тока используются электровзрывные и взрывные размыкатели тока.

В докладе сравниваются две известные схемы ДВМГ с взрывным размыкателем тока (ВРТ). В одной из них размыкатель расположен в передающей линии ДВМГ, в другой – размыкатель находится вне объема дискового генератора.

Ключевые слова: дисковый взрывомагнитный генератор, коммутация тока, взрывной размыкатель тока, численное моделирование.

LAUOUTS OF THE CURRENT FORMER BASED ON DISK MAGNETO-CUMULATIVE GENERATOR AND EXPLOSIVE CURRENT OPENING SWITCH

Sychev Aleksey Anatolyevich (AASychev@vniief.ru), Vlasov Yuri Valentinovich

Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute
of Experimental Physics (RFNC-VNIIEF), Sarov Nizhny Novgorod region

One of the methods of the material characteristics study within the range of density and temperature corresponding to high energy density physics is a processing of the measurement results of wave and mass velocities in the target at the striker collision. The striker moves with the velocity of ~10 km/s. The striker can be accelerated up to such a velocity by means of explosive or electromagnetic methods; the latter one has some advantages. It is necessary to use energy sources capable to form multi-megampere current pulses in the load with a microsecond rise time for the electromagnetic acceleration of the strikers. A disk magneto-cumulative generator (DMCG) with a current opening switch has such output characteristics. Electro-explosive and explosive current opening switches are used in DMCG for a current pulse sharpening.

Two known layouts of the DMCG with an explosive current opening switch (EOS) are compared in the report. The opening switch is located in the transmission line of the DMCG in the first one; in the second one, it is located out of the DMCG volume.

Key words: disk magneto-cumulative generator, current commutation, explosive current opening switch, numerical simulation.

Введение

Для электромагнитного ускорения токопроводящих пластин или оболочек до скоростей ~10 км/с требуются многомегаамперные импульсы тока

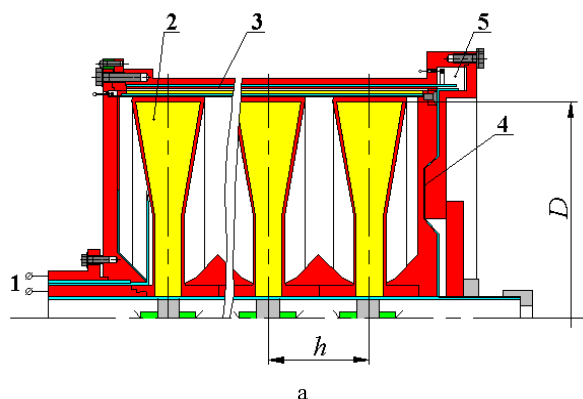
с микросекундным временем нарастания. Такие импульсы тока можно получить от стационарных источников на основе конденсаторных батарей [1], либо от устройств на основе дисковых взрывомаг-

нитных генераторов с размыкателями [2–4]. В устройствах на основе ДВМГ используются как электровзрывные [2], так и взрывные [3, 4] размыкатели тока. Электровзрывные размыкатели просты в своем конструктивном исполнении и занимают малый объем, поэтому обычно располагаются в передающей линии от ДВМГ к нагрузке [2]. Но у них есть недостатки – неуправляемое срабатывание и потери энергии генератора на электровзрыв токоведущего проводника (фольги). У взрывных размыкателей эти недостатки отсутствуют [5], однако они менее компактны и требуют обеспечения внешнего воздействия на фольгу с разновременностью $\sim 0,1$ мкс. Наиболее простым способом обеспечения воздействия на фольгу с такой разновременностью является расположение размыкателя вне объема генератора [4]. Однако с ростом размеров генератора растут и размеры размыкателя из-за необходимости обеспечения его работы в режиме, исследованном экспериментально [4]. Это значительно усложняет устройство.

В работе [3] представлен взрывной размыкатель, расположенный в передающей линии от ДВМГ к нагрузке. Таким образом, имеются две схемы формирователя тока на основе ДВМГ с взрывным размыкателем. В работе приводится сравнение этих двух схем.

Схемы формирователя тока на основе ДВМГ с ВРТ

Рассмотрим две известные схемы формирователя тока на основе ДВМГ с размыкателем [4]. В схеме, представленной на рис. 1, размыкатель (взрывной или электровзрывной) расположен в передающей линии от ДВМГ к нагрузке, где D – диаметр дискового заряда, h – ширина дискового элемента, L_{g1} , L_{pk1} – индуктивность одного элемента ДВМГ и индуктивность участка размыкателя в контуре ДВМГ, расположенного над одним его элементом, L_{pn1} – индуктивность участка контура нагрузки, расположенного над одним элементом ДВМГ, L_{out} – индук-



тивность лайнерной сборки. В схеме на рис. 2 взрывной размыкатель расположен вне объема ДВМГ, где D – диаметр дискового заряда, h – ширина дискового элемента, L_{g1} , $L_{пл1}$ – индуктивность одного элемента ДВМГ и индуктивность участка передающей линии от ДВМГ к ВРТ, приходящаяся на один элемент ДВМГ, L_{pk} – индуктивность участка контура ДВМГ, расположенного под фольгой размыкателя, L_{pn} – индуктивность участка контура нагрузки, расположенного над фольгой размыкателя, L_{out} – индуктивность лайнерной сборки.

В первой схеме инициирование заряда взрывчатого вещества (ВВ) размыкателя производится ударной волной от дисковых зарядов, поэтому момент начала коммутации тока t_0 относительно начала работы ДВМГ фиксирован и определяется в основном их диаметром. Во второй схеме инициирование дисковых зарядов генератора и заряда ВВ размыкателя производится независимо друг от друга, поэтому имеется возможность управления моментом начала коммутации тока. Невозможность управления моментом начала коммутации тока является недостатком первой схемы. Тем не менее, устройство в этом случае получается более компактным из-за отсутствия устройства инициирования заряда ВВ размыкателя.

Оценка характеристик импульса тока в нагрузке

Работа формирователя тока разделена на две стадии – стадия усиления тока в ДВМГ и стадия его коммутации в нагрузку. Нагрузка обычно содержит в себе передающую линию от формирователя и область пространства, где расположен исследуемый объект (например, лайнерная сборка).

Для учета потерь магнитного потока при работе ДВМГ можно воспользоваться расчетной моделью на основе коэффициента совершенства F [6]. Согласно этой модели зависимость $I_k(t)$ тока в контуре ДВМГ от времени определяется по известной (см., например, [7]) зависимости от времени индуктивно-

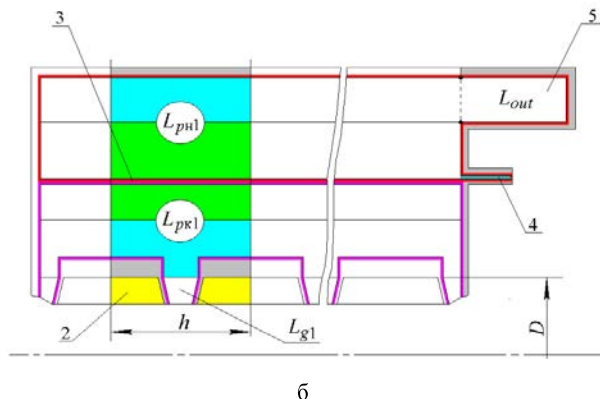


Рис. 1. n -элементный ДВМГ с размыкателем тока, расположенный над дисковыми элементами в передающей линии к нагрузке: а – эскиз устройства; б – расчетная схема устройства: 1 – электроды от спирального ВМГ, 2 – дисковый заряд ВВ одного элемента генератора, 3 – фольга ВРТ, 4 – замыкающий ключ, 5 – нагрузка

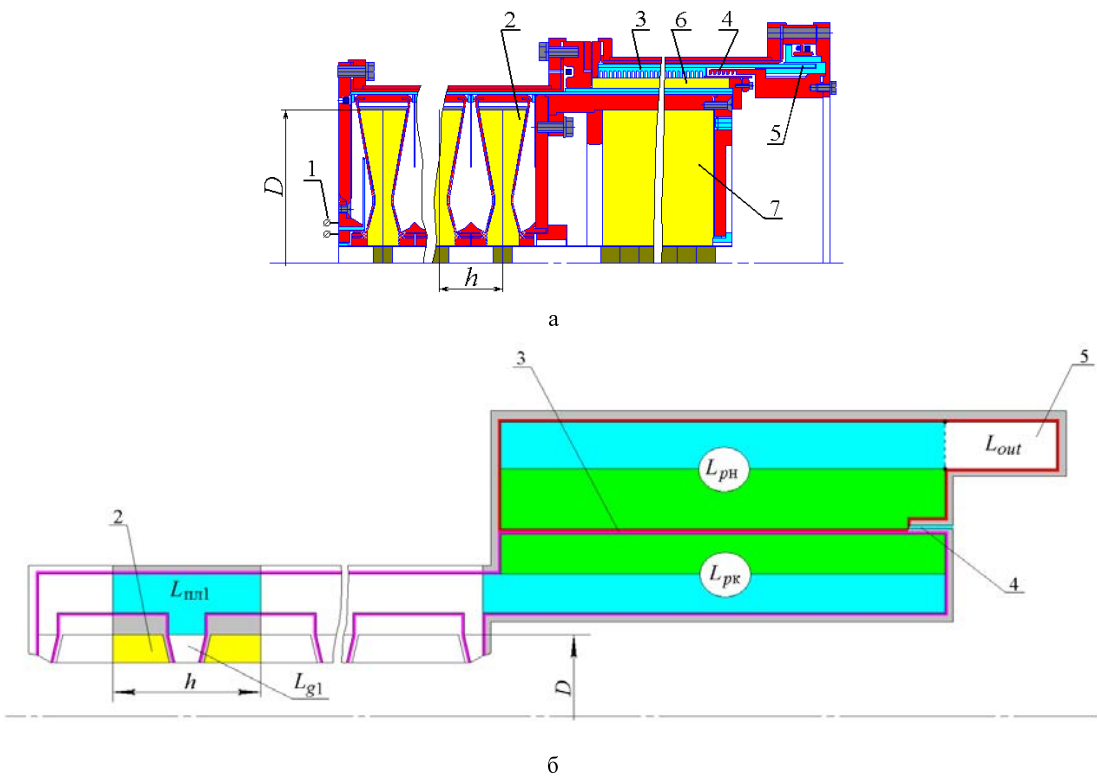


Рис. 2. n -элементный ДВМГ с размыкателем, расположенный вне объема генератора: а – эскиз устройства; б – расчетная схема устройства: 1 – электроды от спирального ВМГ, 2 – дисковый заряд ВВ одного элемента генератора, 3 – фольга ВРТ, 4 – замыкающий ключ, 5 – нагрузка, 6, 7 – заряды ВВ

сти $L_k(t)$ его контура: $I_k(t) = I_0(L_k(0)/L_k(t))^F$. Здесь I_0 , $L_k(0)$ – ток запитки и начальная индуктивность контура ДВМГ. Из формулы видно, что у генератора без потерь $F = 1$, а у генератора, который поддерживает ток в контуре постоянным, $F = 0$. Коэффициент совершенства F определяется из имеющихся экспериментальных данных (рис. 3). Чем больше параметры исследуемого ДВМГ отличаются от параметров генератора, по результатам испытания которого определен коэффициент совершенства, тем меньше будет точность предсказания результатов этой моделью.

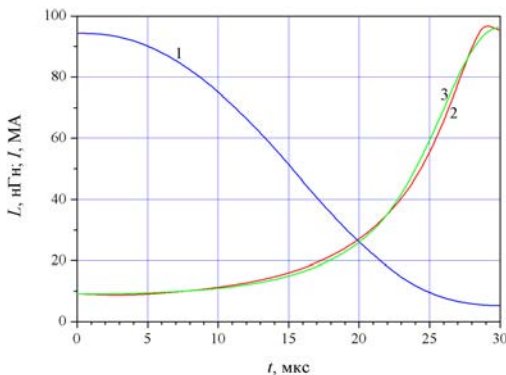


Рис. 3. График временных зависимостей: 1 – расчетная по упрощенной модели зависимость $L_k(t)$ индуктивности контура ДВМГ, 2 – экспериментальная зависимость тока ДВМГ, 3 – зависимость тока ДВМГ, найденная согласно выражению $I_k(t) = I_0(L_k(0)/L_k(t))^F$ при $F = 0,82$

Для оценки выходных характеристик импульса тока в нагрузке n -элементного ДВМГ с ВРТ, расположенным над дисками в передающей линии от ДВМГ к нагрузке рассмотрим эквивалентную электрическую схему коммутации тока, представленную на рис. 4, предполагая, что изменение индуктивности контура ДВМГ в процессе коммутации тока невелико. В данной схеме индуктивность разрывающегося контура L_k и индуктивность нагрузки L_n разбиты на участки, n – количество элементов ДВМГ, R_{p1} – сопротивление участка размыкателя, расположенного над одним элементом ДВМГ, K – замыкающий ключ в контуре нагрузки. Остальные обозначения указаны согласно эскизу и расчетной схеме, представленной на рис. 1.

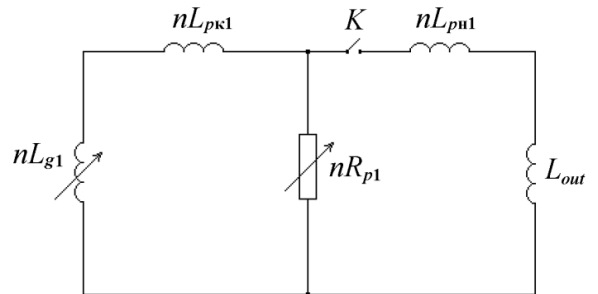


Рис. 4. Эквивалентная электрическая схема коммутации тока ДВМГ взрывным размыкателем, расположенным в передающей линии от ДВМГ

Учитывая, что $L_k = nL_{k1} = n(L_{g1} + L_{pk1})$, где L_{k1} – индуктивность участка контура ДВМГ, относящегося к одному его элементу, L_{g1} , L_{pk1} – индуктивность одного элемента ДВМГ и индуктивность участка размыкателя в контуре ДВМГ, расположенного над одним его элементом, найдем разрываемый ток: $I_{k0} = I_k(t_0) = I_0(L_k(0)/L_k(t_0))^F = I_0((L_{g1}(0) + L_{pk1})/(L_{g1}(t_0) + L_{pk1}))^F$. Как видно из формулы, разрываемый ток в данной схеме не зависит от количества элементов ДВМГ.

При фиксированной индуктивности лайнерной сборки L_{out} ток в нагрузке $L_n = nL_{pn1} + L_{out}$ после коммутации равен [8]: $I_{nmax} = I_{k0}((L_k + L_n)/L_k) = I_{k0}/(1 + (L_{pn1} + L_{out}/n)/L_{k1})$, где L_{pn1} – индуктивность участка контура нагрузки, расположенного над одним элементом ДВМГ. Из формулы видно, что с ростом n ток в нагрузке после коммутации стремится к величине $I_{k0}/(1 + L_{pn1}/L_{k1})$, которая не зависит от индуктивности лайнерной сборки, а определяется только параметрами генератора и размыкателя.

Характер изменения тока в нагрузке в процессе коммутации определяется отношением сопротивления размыкателя $R_p = nR_{p1}$ (где R_{p1} – сопротивление участка размыкателя, расположенного над одним элементом ДВМГ) к эффективной индуктивности $L_{эфф}$ [8]: $L_{эфф} = L_k L_n / (L_k + L_n) = L_k / (L_k/L_n + 1) = nL_{k1} / (L_{k1}/(L_{pn1} + L_{out}/n) + 1)$. Это отношение $R_p/L_{эфф} = R_{p1}(L_{k1}/(L_{pn1} + L_{out}/n) + 1)/L_{k1}$ с ростом n стремится к $R_{p1}(L_{k1}/L_{pn1} + 1)/L_{k1}$ и также не зависит от L_{out} . Таким образом, в данном устройстве при фиксированной индуктивности лайнерной сборки не имеет смысла увеличивать количество дисковых элементов, если $nL_{pn1} \gg L_{out}$.

Эквивалентная электрическая схема коммутации тока ДВМГ взрывным размыкателем, расположенным за пределами объема ДВМГ, представлена на рис. 5. В данной схеме индуктивность разрываемого контура L_k и индуктивность нагрузки L_n разбиты на участки, где n – количество элементов ДВМГ, R_p – сопротивление размыкателя, K – замыкающий ключ в контуре нагрузки. Остальные элементы схемы указаны согласно эскизу и расчетной схеме, представленной на рис. 2.

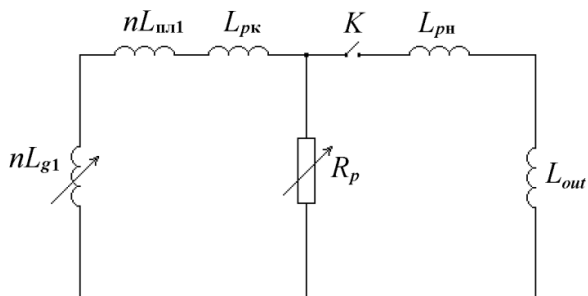


Рис. 5. Эквивалентная электрическая схема коммутации тока ДВМГ с взрывным размыкателем, расположенным за пределами объема ДВМГ

Для сравнения с предыдущей схемой возьмем ДВМГ с такими же параметрами и коммутацию тока будет производить в тот же самый момент времени t_0 . Разрываемый ток I_{k0} в этом случае растет с ростом количества элементов ДВМГ n . Это следует из формулы для тока ДВМГ через коэффициент совершенства: $I_k(t) = I_0(L_k(0)/L_k(t))^F$. Учитывая, что в этом случае $L_k = n(L_{g1} + L_{pn1}) + L_{pk}$, где L_{g1} , L_{pn1} – индуктивность одного элемента ДВМГ и участка передающей линии к размыкателю, расположенного над одним элементом ДВМГ (см. рис. 2), L_{pk} – собственная индуктивность размыкателя в контуре ДВМГ (не зависит от n), найдем разрываемый ток: $I_{k0} = I_k(t_0) = I_0(L_k(0)/L_k(t_0))^F \approx I_0(L_{g1}(0)/(L_{g1}(t_0) + L_{pn1} + L_{pk}/n))^F$ (считаем, что начальная индуктивность одного элемента ДВМГ намного больше, чем сумма L_{pn1} и L_{pk}/n). Таким образом, I_{k0} растет с ростом n , и при больших n разрываемый ток $I_{k0} \approx I_0(L_{g1}(0)/(L_{g1}(t_0) + L_{pn1}))^F$.

Сопротивление размыкателя $R_p(t)$, а также его индуктивность в контуре нагрузки L_{pn} в рассматриваемом устройстве не зависят от количества элементов ДВМГ. В расчетах взята такая же зависимость сопротивления размыкателя от времени, как в 10-элементном ДВМГ с ВРТ над дисками. При фиксированной индуктивности лайнерной сборки L_{out} ток в нагрузке $L_n = L_{pn} + L_{out}$ после коммутации [8]: $I_{nmax} = I_{k0}((L_k + L_n)/L_k) = I_{k0}/(1 + L_n/(n(L_{g1}(t_0) + L_{pn1}) + L_{pk}))$ с ростом n стремится к I_{k0} , который, в свою очередь, растет с ростом n .

Модель для численных расчетов

Оценки, приведенные выше, не учитывают ни характер изменения сопротивления размыкателя в зависимости от времени, ни изменение индуктивности ДВМГ в процессе коммутации тока. Для учета этих факторов требуется проведение численного моделирования. Для рассмотренных схем ДВМГ с ВРТ разработаны расчетные модели средствами программы MicroCap [9]. Это универсальная программа схемотехнического анализа, предназначенная для решения широкого круга задач. Несмотря на достаточно скромные требования к программно-аппаратным средствам компьютера, ее возможности позволяют анализировать не только аналоговые, но и цифровые схемы. Характерной особенностью этой программы является наличие удобного графического интерфейса. Имеется также большое количество примеров. Это существенно упрощает освоение программы и изучение приемов моделирования. Достаточно найти подходящий пример и провести свой расчет «по образцу и подобию». С 2019 года программа не является коммерческой [9].

В разработанных расчетных моделях индуктивность разрываемого контура L_k и индуктивность нагрузки L_n разбиты на участки, согласно эскизам и расчетным схемам, представленным на рис. 1 и рис. 2.

Количество элементов ДВМГ, момент начала разрыва его контура, коэффициент совершенства и величина индуктивности лайнерной сборки являются входными параметрами. Величина разрываемого тока $I_k(t_0)$ определяется индуктивностью контура ДВМГ в этот момент и коэффициентом его совершенства.

Зависимость индуктивности ДВМГ от времени $L_g(t)$ задавалась путем аппроксимации табличной зависимости, полученной из расчетов по упрощенной модели ДВМГ [7], экспоненциальной функцией со степенным показателем: $L_g(t) = L_{g0} \cdot \exp(-(t/\tau)^q)$, где $L_{g0} = nL_{g01}$ – начальная индуктивность ДВМГ, n – количество его элементов, L_{g01} – начальная индуктивность одного элемента ДВМГ, τ и q – параметры. Для того, чтобы ток в контуре ДВМГ в процессе его работы изменялся по закону $I_k(t) = I_0(L_k(0)/L_k(t))^F$, где I_0 – ток запитки ДВМГ, сопротивление в контуре ДВМГ задавалось в виде: $(F - 1)dL_k/dt$. Время отсчитывается от начала работы ДВМГ.

Сопротивление размыкателя, начиная с заданного момента t_0 начала разрыва контура, изменяется по степенному закону с ограничением на максимальное значение: $R_p(t) = \text{if}(t < t_0, 0, \min(A((t - t_0)/t_1)^b, R_{p\max}))$. Здесь A , b , $R_{p\max}$ – параметры, $t_1 = 1$ мкс. Параметры этой зависимости определялись по результатам ранее проведенных экспериментов с учетом поправок на размеры и линейную плотность тока через фольгу размыкателя к моменту начала разрыва контура.

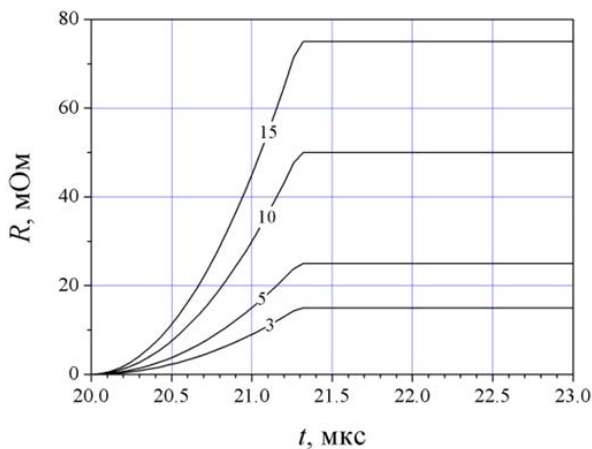
Исходные данные и результаты расчетов

Опыты с одноэлементным ДВМГ обычно не проводятся. Поэтому при проведении расчетов удобнее взять за базовый не одноэлементный генератор, а генератор с количеством элементов n_0 . В этом случае зависимость индуктивности ДВМГ от времени в n -элементном и n_0 -элементном генераторах связаны друг с другом следующим образом: $L_g(t, n) = (n/n_0)L_g(t, n_0)$. В расчетах за базовый был взят 10-элементный ДВМГ ($n_0 = 10$).

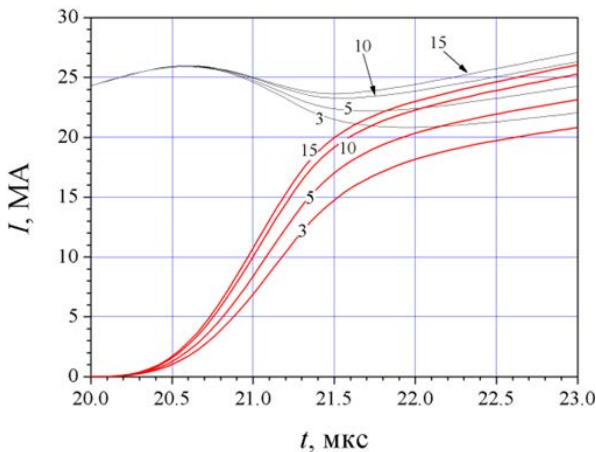
Индуктивность 10-элементного ДВМГ описывалась экспоненциальной функцией со степенным показателем. Параметры этой функции: $L_{g0} = 200$ нГн, $\tau = 18$ мкс, $q = 4,0$. Запитка генератора производилась начальным током $I_0 = 9$ МА. Коэффициент совершенства генератора $F = 0,8$. Сопротивление размыкателя, расположенного в передающей линии 10-элементного ДВМГ, описывалось степенным законом с ограничением на максимальное значение. Параметры этой зависимости: $A = 30$ МОм, $b = 2,0$, $R_{p\max} = 50$ МОм. Индуктивность конечного контура ДВМГ $L_f = 20$ нГн. В схеме с ВРТ в передающей линии ДВМГ она равна собственной индуктивности размыкателя $L_{рк}$. В схеме с ВРТ за пределами объема ДВМГ она состоит из индуктивности передающей линии к размыкателю ($L_{пл} = 5$ нГн) и собственной

индуктивности размыкателя ($L_{рк} = 15$ нГн). Собственная индуктивность размыкателя в контуре нагрузки $L_{рн} = 15$ нГн. Индуктивность лайнерной сборки $L_{out} = 5$ нГн.

Результаты расчета коммутации тока n -элементного ДВМГ с ВРТ над дисками в передающей линии к нагрузке при $n = 3, 5, 10, 15$ при различном количестве дисковых элементов представлены на рис. 6. Числа в разрыве кривых обозначают количество элементов ДВМГ. Предполагалось, что разрыв контура ДВМГ производится через 20 мкс после начала его работы. Видно, что разрываемый ток не зависит от количества элементов размыкателя, а изменение тока в нагрузке с ростом n все меньше. Эти выводы соответствуют полученным выше оценкам. Кроме того, из расчетов получены зависимости от времени токов и напряжений в схеме коммутации.



а



б

Рис. 6. Графики временных расчетных зависимостей: а – сопротивление размыкателя, б – ток ДВМГ (тонкие линии) и ток в нагрузке (жирные линии)

Результаты расчета коммутации тока n -элементного ДВМГ с ВРТ, расположенным за пределами объема ДВМГ при $n = 3, 5, 10, 15$ представлены на рис. 7. Числа в разрыве кривых обозначают количество элементов ДВМГ. Так же, как и в расчете ДВМГ с ВРТ в передающей линии,

разрыв контура ДВМГ производился через 20 мкс после начала его работы. Для расчетов ДВМГ с размыкателем, расположенным вне его объема, взята такая же зависимость сопротивления размыкателя от времени, как в 10-элементном ДВМГ с ВРТ над дисками. Видно, что разрываемый ток $I_{к0}$ растет с ростом количества элементов ДВМГ n , причем, чем больше n , тем медленнее он растет. При фиксированной индуктивности лайнерной сборки L_{out} ток в нагрузке после коммутации с ростом n тремится к $I_{к0}$, который, в свою очередь, растет с ростом n . Эти выводы соответствуют полученным выше оценкам.

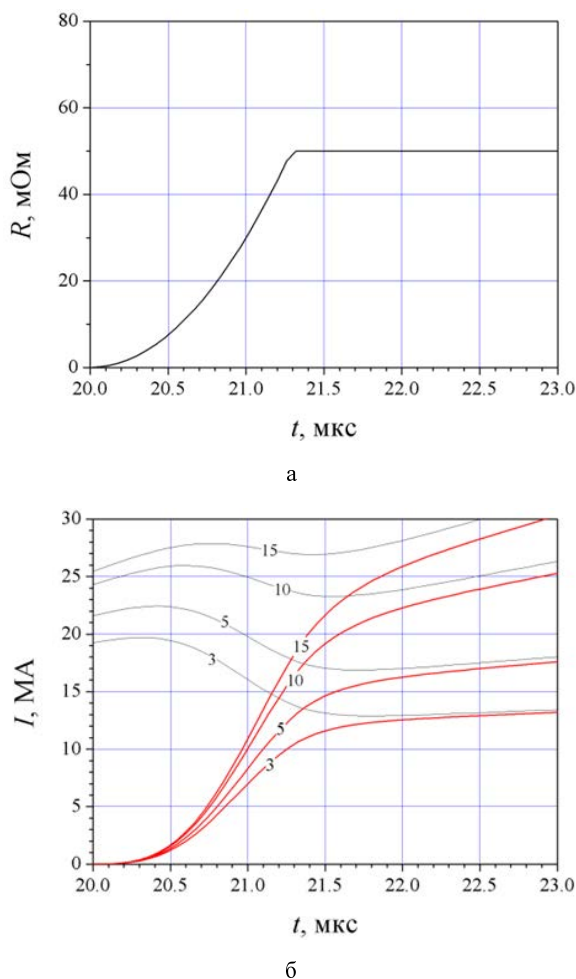


Рис. 7. Графики временных расчетных зависимостей: а – сопротивление размыкателя, б – ток ДВМГ (тонкие линии) и ток в нагрузке (жирные линии)

Зависимости максимального напряжения на размыкателе и напряжения на лайнерной сборке индуктивностью L_{out} от n в обоих вариантах представлены на рис. 8. Видно, что с ростом n максимальное напряжение на размыкателе растет линейно для ДВМГ с ВРТ над дисками, и $\sim n^{1/3}$ – для ВРТ за пределами объема ДВМГ. Напряжение на лайнерной сборке растет с ростом n для ВРТ за пределами

ДВМГ и практически не изменяется при $n > 10$ если ВРТ расположен над ДВМГ.

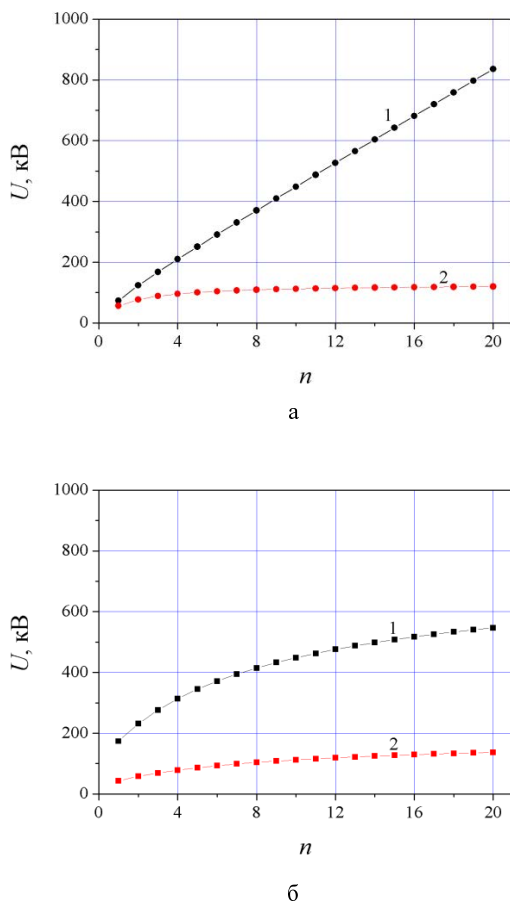


Рис. 8. Графики зависимостей максимального напряжения на размыкателе от количества дисковых элементов в ДВМГ с ВРТ: а – над дисками: 1 – напряжение на размыкателе, 2 – напряжение на лайнерной сборке; б – за пределами объема ДВМГ: 1 – напряжение на размыкателе, 2 – напряжение на лайнерной сборке

Заключение

Проведено сравнение двух известных схем ДВМГ с взрывным размыкателем: размыкатель расположен над дисковыми элементами в передающей линии к нагрузке, и размыкатель расположен вне объема ДВМГ. Невозможность управления моментом начала коммутации тока является недостатком первой схемы. Тем не менее, устройство в этом случае получается более компактным из-за отсутствия устройства инициирования заряда ВВ размыкателя.

Сравнение проводилось как на основе оценок в предположении мгновенной коммутации тока, так и по результатам численных расчетов. Расчет тока ДВМГ производился по известной индуктивности его контура и коэффициенту совершенства, полученному из имеющихся экспериментальных данных. Сопротивление размыкателя, расположенного над дисками в передающей линии к нагрузке, пропор-

ционально количеству элементов ДВМГ. Для расчетов ДВМГ с размыкателем, расположенным вне его объема, взята такая же зависимость сопротивления размыкателя от времени, как в 10-элементном ДВМГ с ВРТ над дисками. Коммутация тока производилась в один и тот же момент времени относительно момента начала работы ДВМГ.

Согласно расчетам, для ДВМГ с ВРТ над дисками в передающей линии к нагрузке разрываемый ток не зависит от количества элементов ДВМГ n , а изменение максимального тока в нагрузке с ростом n все меньше. Поэтому не имеет смысла в данной схеме использовать генератор с большим количеством элементов. Максимальное напряжение на размыкателе с ростом n растет линейно, а напряжение на лайнерной сборке, начиная с некоторого n , практически не изменяется.

Для ДВМГ с ВРТ, расположенным за пределами объема ДВМГ, разрываемый ток $I_{к0}$ растет с ростом количества элементов ДВМГ, причем, чем больше n , тем медленнее он растет. При фиксированной индуктивности лайнерной сборки ток в нагрузке после коммутации с ростом n стремится к $I_{к0}$, который, в свою очередь, растет с ростом n . Максимальное напряжение на размыкателе и на лайнерной сборке растет $\sim n^{1/3}$.

Результаты проведенных расчетов будут использоваться при разработке взрывомагнитного устройства для исследования свойств материалов.

Список литературы

1. Lemke R. W., Dolan D. H., Dalton D. G., Brown J. L., Tomlinson K., Robertson G. R., Knudson M. D., Harding E., Mattsson A. E., Carpenter J. H., Drake R. R., Cochrane K., Blue B. E., Robinson A. C., and Mattsson T. R. Probing off-Hugoniot states in Ta, Cu, and Al to 1000 GPa compression with magnetically driven liner implosions // JOURNAL OF APPLIED PHYSICS. 2016, 015904, 119.

2. Chernyshev V. K., Buyko A. M., Kostyukov V. N. et al. Investigation of electrically exploded large area foil for current switching // Megagauss fields and pulsed power systems / Titov V. M., Shvetsov G. A. Eds. N. Y.: Nova Science Publishers, Inc. 1990. P. 465–470.

3. Demidov V. A., Demin A. N., Kazakov S. A. et al. Disk Explosive Magnetic Generator with Low Risetime in the Load // Proceedings of the 12th International Conference on High Power Particle Beams. Ed M. Markovits and J. Shiloh. Haifa. Israel. 1998. P. 588–590.

4. Demidov V. A. Explosive current opening switches // IEEE Transactions on Plasma Science. 2017. Vol. 45. N 12, part 2. P. 3356–3363.

5. Азизов Э. А., Янковский Б. Д. Взрывные размыкатели тока // Физика и техника мощных импульсных систем: Сб. ст. / Под ред. акад. Е. П. Велихова М.: Энергоатомиздат, 1987. С. 224–236.

6. Демидов В. А., Жаринов Е. И., Казаков С. А., Чернышев В. К. Вывод энергии из индуктивных накопителей и взрывомагнитных генераторов в индуктивную нагрузку с помощью разрыва контура // ПМТФ. 1978. № 4. С. 54–60.

7. Борискин А. С., Буйко А. М., Васюков А. М., и др. Магнитокумулятивные генераторы – импульсные источники энергии: Монография. В 2-х томах / Под ред. В. А. Демидова, Л. Н. Пляшкевича, В. Д. Селемира. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2012. Т. 1. С. 439.

8. Борискин А. С., Буйко А. М., Власов Ю. В., Гаранин С. Ф., Демидов В. А., Казаков С. А., Пляшкевич Л. Н., Селемир В. Д. Магнитокумулятивные генераторы – импульсные источники энергии: в 2-х томах. / Под ред. В. А. Демидова, Л. Н. Пляшкевича, В. Д. Селемира. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2019. Т. 2. С. 274.

9. Micro-Cap 11.0 Electronic Circuit Analysis Program User's Guide. Copyright 1982-2014 by Spectrum Software 1021 South Wolfe Road Sunnyvale, CA 94086. URL: www.spectrum-soft.com.