

МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ
ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ЭВМ

УДК 538.4 : 53.072 : 681.31

В. М. АЛЕКСАНДРОВ, А. П. БАЙКОВ, В. А. ИВАНОВ, А. М. ИСКОЛЬДСКИЙ,
Л. С. КРОТМАН, Ю. Е. НЕСТЕРИХИН, А. А. НЕСТЕРОВ

(Новосибирск)

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ
ВЗРЫВОМАГНИТНОГО ГЕНЕРАТОРА С ПРЕРЫВАТЕЛЕМ ТОКА

Предложенный А. Д. Сахаровым принцип кумуляции магнитного потока [1] позволяет использовать энергию взрыва ВВ для получения мощных электрических импульсов. По величине энергии и развиваемой мощности взрывомагнитные генераторы (ВМГ) в настоящее время являются наиболее перспективными устройствами в экспериментальной физике. Принцип действия ВМГ ясен из рис. 1. После срабатывания управляемого разрядника Р происходит разряд конденсаторной батареи С через медленные шины Ш генератора и сопротивление нагрузки Z_n . В момент максимума тока производится подрыв ВВ, и детонационная волна начинает двигаться от детонатора Д направо. После того, как образуется контакт кассеты К с обеими шинами ВМГ (это положение обозначено штриховыми линиями), батарея перестает оказывать влияние на дальнейший ход процесса, а захваченный магнитный поток вытесняется в нагрузочный контур. При деформации контура тока производится работа против пондермоторных сил поля, так как магнитное давление препятствует деформации контура. Следовательно, электромагнитная энергия системы должна возрастать. Действительно, если потери энергии невелики, то, как показано в [1], к концу цикла работы ВМГ ток и энергия возрастают в η раз, где $\eta = (L_0 + L_n)/L_n$ — коэффициент перестройки; L_n — индуктивность нагрузки, а L_0 — начальная индуктивность генератора.

Длительность T цикла работы ВМГ составляет обычно 50—100 мкс, а между тем в экспериментальной физике часто возникает потребность в мощных импульсах тока значительно меньшей длительности. Так, например, в плазменных экспериментах это диктуется временем жизни плазмы, в технике сверхсильных магнитных полей ток должен достичь максимума раньше, чем соленоид будет разорван магнитным давлением и т. д. Для таких экспериментов Кроуфорд и Дамиров [2] предложили использовать взрывомагнитный генератор с прерывателем тока на основе взрывающегося проводника. Идея устройства заключается в том, что ВМГ (переменная индуктивность L_r на рис. 2) осуществляет накачку энергии в магнитный накопитель (индуктивность L_1), а в нагрузку (L_n, r_n) энергия практически не поступает, так как она зашунтирована очень малым сопротивлением r_n прерывателя тока. В конце цикла происходит электрический взрыв прерывателя, его сопротивление резко возрастает, и вся запасенная энергия за короткое время передается в

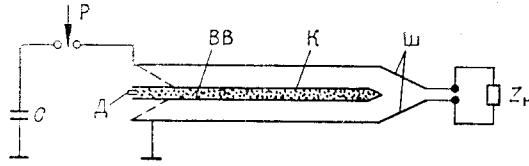


Рис. 1.

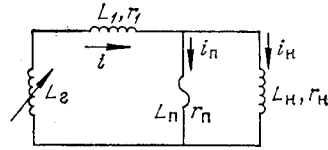


Рис. 2.

нагрузку. Реальное устройство характеризуется также паразитными параметрами: магнитный накопитель — активным сопротивлением r_1 , а прерыватель — индуктивностью L_n .

Целью настоящей работы является оптимизация параметров прерывателя из условия максимальной мощности в нагрузке в конце цикла. Прежде всего составим систему дифференциальных уравнений, описывающих работу ВМГ с прерывателем тока:

$$\begin{aligned} L_r \frac{di}{dt} + i \frac{dL_r}{dt} + L_1 \frac{di}{dt} + r_1 i + r_n i_n + L_n \frac{di_n}{dt} &= 0; \\ r_n i_n + L_n \frac{di_n}{dt} &= r_n i_n + L_n \frac{di_n}{dt}; \\ i &= i_n + i_n; \\ r_n &= f(t). \end{aligned}$$

Последнее уравнение системы задает изменение сопротивления прерывателя во времени и должно определяться из экспериментов по электрическому взрыву проводника. В настоящей работе в качестве прерывателя электрического взрыва меняется следующим образом: от начального использовалась алюминиевая фольга, сопротивление которой в процессе значения r_0 до $20r_0$ сопротивление r_n растет пропорционально введенной в фольгу энергии, а от $20r_0$ до $100r_0$ изменяется за короткое время, примерно за 250 нс. С учетом обстоятельства, что специальными мерами удается увеличить возрастание сопротивления в процессе электрического взрыва (например, помещая фольгу внутрь твердого диэлектрика), для r_n была принята несколько иная модель, а именно: сопротивление растет пропорционально энергии до $50r_0$, а от $50r_0$ до $500r_0$ — линейно во времени за 250 нс. Таким образом, последнее уравнение системы можем записать в виде

$$r_n = \begin{cases} r_0 + kQ, & r_n \leq 50r_0; \\ 50r_0 + \frac{450r_0}{2,5 \cdot 10^{-7}} (t - t_1), & r_n > 50r_0, \end{cases}$$

где t_1 — время от начала процесса до момента достижения сопротивлением прерывателя значения $50r_0$. Учитывая, что

$$Q = \int_0^t r_n(t) i_n^2(t) dt,$$

энергетическую зависимость для r_n можно записать еще в дифференциальной форме

$$\frac{dr_n}{dt} = kr_n i_n^2,$$

или в форме так называемого интеграла действия

$$r_n = r_0 e^{k \int_0^t i_n^2(\tau) d\tau}.$$

Приведенная выше система нелинейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами не может быть, по-видимому, решена аналитически. Поэтому было проведено моделирование ее на АВМ. При этом рассматривались оба этапа: сначала моделировался разряд конденсаторной батареи C через индуктивность L_k и сопротивление подводящих кабелей r_k, L_0, L_1, r_1 и параллельно соединенные прерыватель с нагрузкой. В момент максимума тока i определялись токи i_n и $i_{n'}$. Затем исследовался второй этап, т. е. решалась приведенная система уравнений с начальными условиями, которые находились из первого этапа. Поскольку сопротивление r_0 и масса m прерывателя полностью его определяют, то эти два параметра и являлись искомыми, все остальные величины были фиксированы. В результате моделирования определялись токи и их производные во всех ветвях, а также мощность в индуктивной нагрузке в конце цикла

$$P_n = L_n i_n(T) \left. \frac{di_n}{dt} \right|_T,$$

которая принималась за критерий оптимизации. Моделировались два генератора: первый с коэффициентом перестройки $\eta=20$ ($L_0=2,4 \cdot 10^{-7}$ Гн; $L_1=1,2 \cdot 10^{-8}$ Гн; $L_n=L_1$; $r_1=0,8 \cdot 10^{-4}$ Ом), а второй — с $\eta=40$ ($L_0=4,8 \cdot 10^{-7}$ Гн; остальные параметры те же, что и в первом генераторе). Установлено, что эффективная передача энергии в нагрузку возможна только в тех случаях, когда индуктивность L_n сравнима по величине с индуктивностью накопителя L_1 . Поэтому было принято $L_n=L_1$, а для сопротивления r_n принималась величина 10^{-4} Ом. Запитка ВМГ осуществлялась от конденсаторной батареи емкостью $C=1,8 \cdot 10^{-3}$ Ф с зарядным напряжением $u_0=4$ кВ. При длительности цикла $T=50$ мкс параметры оптимального прерывателя для первого ВМГ таковы: $r_0=4 \cdot 10^{-4}$ Ом; $m=0,30$ г; $L_n=10^{-8}$ Гн. Этот прерыватель — алюминиевая фольга толщиной 10 мкм, шириной (размер поперек направления тока) 260 мм и длиной 36 мм. Генератор с таким прерывателем развивает в конце цикла ток через нагрузку 1,8 МА, напряжение 30 кВ, скорость нарастания тока $2,5 \cdot 10^{12}$ А/с, мощность $5,4 \cdot 10^{10}$ Вт. На рис. 3 приведены кривые нарастания тока нагрузки при работе ВМГ с прерывателем (2) и без него (1). Время удвоения тока для кривой 1 составляет 5 мкс, а для кривой 2 — 3 мкс, мощность в нагрузке в конце цикла увеличена за счет прерывателя более чем в два раза. Оптимизированный прерыватель для второго генератора позволяет достичь следующих показателей: тока нагрузки 2,8 МА, напряжения 50 кВ, скорости нарастания тока $4,3 \cdot 10^{12}$ А/с, мощности $1,4 \cdot 10^{11}$ Вт. Исследована зависимость мощности

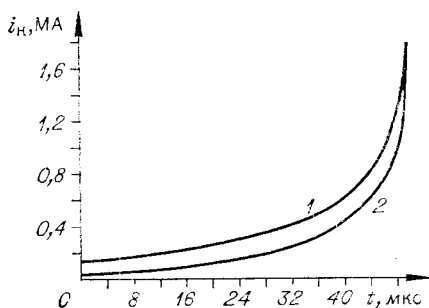


Рис. 3.

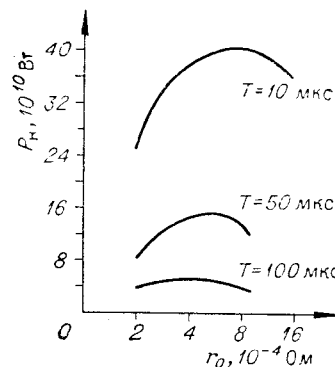


Рис. 4.

генератора от начального сопротивления прерывателя r_0 . При этом каждому значению r_0 соответствует оптимальная масса прерывателя. Эта зависимость тем критичнее, чем меньше длительность цикла T генератора (рис. 4). Из этого же рисунка видно влияние длительности цикла ВМГ на величину мощности.

Так, при сокращении длительности от $T=50$ мкс до $T=10$ мкс второй генератор увеличивает мощность в конце цикла с $1,4 \cdot 10^{11}$ до $4,2 \cdot 10^{11}$ Вт. Влияние отношения r_m/r_0 , где r_m — максимальное в процессе электрического взрыва сопротивление прерывателя, на скорость нарастания тока и мощность в нагрузке первого ВМГ демонстрируется рис. 5 (ток нагрузки от r_m/r_0 не зависит). Рис. 6 показывает, как резко снижается скорость нарастания тока и соответственно мощность в нагрузке при увеличении длительности времени τ , в течение которого происходит возрастание сопротивления прерывателя от 50 до 500 r_0 . Наконец, на рис. 7 графиче-

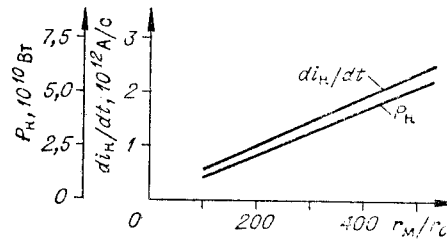


Рис. 5.

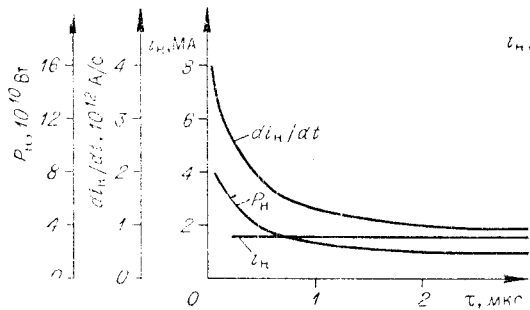


Рис. 6.

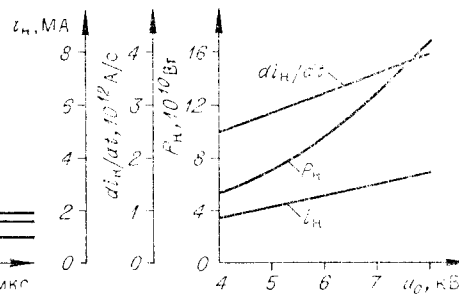


Рис. 7.

чески представлены зависимости i_n , $\frac{di_n}{dt}$ и P_n от зарядного напряжения U_0 конденсаторной батареи. Из рисунка следует, что повышение зарядного напряжения в два раза (с 4 до 8 кВ) позволяет увеличить мощность в три раза.

ВЫВОДЫ

Применение прерывателя на основе взрывающейся алюминиевой фольги увеличивает мощность ВМГ в конце цикла не менее чем в два раза.

Мощность в нагрузке ВМГ существенно зависит от степени оптимизации прерывателя по массе и начальному сопротивлению и увеличивается с ростом отношения r_m/r_0 и зарядного напряжения конденсаторной батареи.

При неизменных размерах и параметрах электрической цепи ВМГ можно заметно увеличить его мощность за счет сокращения длительности цикла. Ввиду этого особую актуальность приобретают работы по созданию быстрых взрывомангнитных генераторов.

Моделирование и оптимизация параметров ВМГ на АВМ позволяют утверждать, что достижение мощности 10^{12} Вт может быть осуществлено, например, с помощью такого генератора: начальная индуктивность $L_0=4,8 \cdot 10^{-7}$ Гн, индуктивность нагрузки $L_n=1,2 \cdot 10^{-8}$ Гн, длительность цикла $T=10$ мкс; прерыватель обеспечивает возрастание сопротивления

в 500 раз за время 250 нс. Зажигка ВМГ осуществляется от конденсаторной батареи емкостью $C=1,8 \cdot 10^{-3}$ Ф с зарядным напряжением $u_0=8$ кВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Д. Сахаров, Р. З. Людаев, Е. П. Смирнов, Ю. И. Пезенев, А. И. Павловский, В. К. Чернышев, Е. А. Феоктистова, Е. И. Жаринов, Ю. А. Зысин. Магнитная кумуляция.— Докл. АН СССР, 1965, № 1.
2. J. C. Crawford, R. A. Damerow. Explosively Driven High-Energy Generators.— J. Appl. Phys., 1968, v. 39, № 11.

Поступила в редакцию 13 сентября 1972 г.

УДК 621.317+681.14

Г. РЕЗНИКОВ, К. ТАРНАИ

(Будапешт)

РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ АМПЛИТУДНО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ НА ЭВМ

При разработке амплитудно-цифрового преобразователя [1] с высокой разрешающей способностью в ЦИФИ АН ВНР с целью расчета и моделирования процесса преобразования была использована функционирующая в институте ЭВМ типа ИСТ-1905.

Упомянутый преобразователь является одним из входных блоков целевой вычислительной машины — амплитудного анализатора, служащего для измерения ядерной энергии. В статье рассматриваются характеристики амплитудного спектра, причины его искажения, классические формы подсчета потерь. Подробно обсуждаются амплитудно-цифровое преобразование и моделирование потерь в счете. В заключение проводится параллель между классическими методами и моделированием на ЭВМ.

Анализ амплитудного спектра. На рис. 1 представлен общий вид одной из установок измерительного комплекса реактора, входным устройством которого является 8192-канальный амплитудно-цифровой преобразователь типа (NE-289). Преобразователь используется для измерения амплитудных спектров.

На рис. 2 показан амплитудный спектр первичной охлаждающей воды реактора VVR-S: кривая 1 соответствует измерению, проведенному с кристаллом NaJ (Tl), а кривая 2 — измерению с полупроводниковым детектором Ge(Li). Две кривые хорошо отражают разницу в разрешающей способности двух детекторов. С помощью полупроводникового детектора удалось определить целый ряд пиков, которые при сцинтиляционном измерении даже не заметны. Для распознавания радиоактивных материалов в первичной охлаждающей воде знать только места пиков, т. е. значения энергии (Zn—71, Ta—186, Xe—138, Zn—62, Rn—222, Mo—101, Ta—177:510 кэВ), недостаточно; для однозначного определения нужно знать и время полураспада. Многократно измеряя и усредняя амплитудный спектр, можно определить время полураспада с хоро-