

ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ В ИМПУЛЬСНОМ ВЗРЫВОМАГНИТНОМ ГЕНЕРАТОРЕ

Успешное решение многих практических задач построения современных радиотехнических систем связано с необходимостью создания новых источников питания, обеспечивающих передачу высоких значений энергий на нагрузку. Развитие данного направления исследования привело к созданию взрывомагнитных генераторов (ВМГ) мощных импульсов электрического тока [1–5]. В основе принципа действия ВМГ лежит явление пространственного сжатия магнитного потока под действием сверхвысоких давлений, образующихся при детонации взрывчатого вещества (ВВ). Использование в ВМГ продуктов детонации (ПД) взрывчатого вещества в качестве привода якоря обычного генератора и создания магнитного поля собственным током генератора, делает возможным значительно миниатюризировать такие источники питания при сохранении высоких значений энергии на нагрузке (до 100 Дж) [2–4]. Вследствие чрезвычайно высоких значений энергий ВМГ уничтожаются во время применения [1–5]. Однако в целом ряде случаев только они могут решить задачи питания генераторов мощного СВЧ-излучения, источников сильноточных пучков электронов и протонов для ускорителей, источников питания мощных лазеров [3–5].

Актуальность и цель исследования. В последнее время появилось достаточно много публикаций, связанных с возможностью работы ВМГ с высокоимпедансными нагрузками, применяемыми как в геофизических средствах прогнозирования землетрясений и поиска полезных ископаемых, так и в некоторых современных методах ведения радиоэлектронной борьбы [2–5]. Выбор и применение ВМГ в данных методах неразрывно связан с возможностью получения максимально возможной энергии на высокоимпедансной нагрузке. Поэтому в данной работе представлены результаты исследования преобразования энергии в замкнутом контуре импульсного ВМГ.

Для анализа физических процессов, происходящих при взрывном сжатии контура с током, рассмотрим структуру, представленную на рисунке 1.

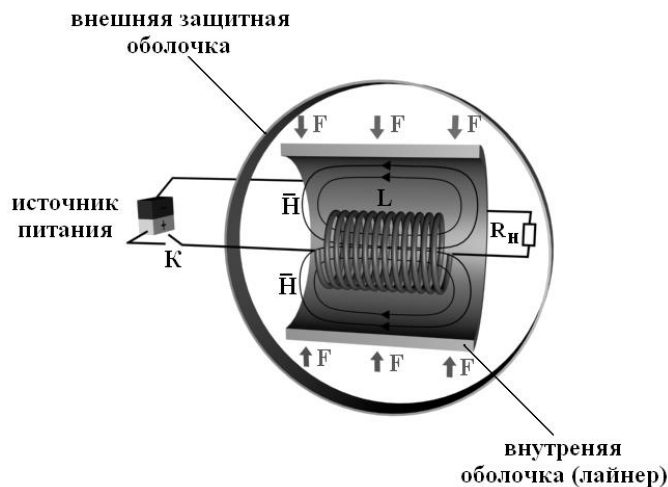


Рисунок 1 – Схема преобразования энергии в ВМГ

Данная структура имеет в своем составе некоторую замкнутую область V , ограниченную прочной защитной оболочкой, в которую помещен соленоид L . Снаружи данной структуры размещается ВВ. Кроме индуктивности данная структура содержит и активное сопротивление нагрузки R_n . При замкнутом ключе K соленоид L через внутреннюю оболочку (лайнер) подключается к источнику постоянного тока с ЭДС ε_0 (см. рисунок 1). В результате в соленоиде начинает циркулировать постоянный ток I . Однако постоянный ток, протекающий в данной цепи, не сразу достигнет предельного значения $\left(I = \frac{\varepsilon_0}{R_n} \right)$, а будет нарастать постепенно.

Явления, происходящие при этом в контуре можно описать следующим дифференциальным уравнением:

$$\varepsilon_0 = L \frac{di}{dt} + R_n i(t), \quad (1)$$

где $L \frac{di}{dt}$ – ЭДС индукции, возникающая при подключении источника тока.

Решение уравнения (1) имеет следующий вид:

$$i(t) = \frac{\varepsilon_0}{R_n} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (2)$$

где постоянная $\tau = L / R_n$ – время установления тока.

Таким образом, переходный процесс будет продолжаться на интервале времени $0 < t \leq \tau$, определяемом значениями индуктивности и активного сопротивления нагрузки. При $i(\tau) \approx I$ ток в контуре достигнет предельного значения. После окончания переходного процесса в данном контуре будет протекать постоянный ток I , который при неизменном объеме V не будет вызывать электромагнитные излучения. Поэтому на интервале времени $\tau < t \leq t_{c1}$ всю запасенную в объеме энергию содержит магнитное поле [2,3]:

$$W = \frac{1}{2} I \int_s \mu H ds = \frac{1}{2} I \Phi. \quad (3)$$

Учитывая, что ток I и объем внутренней области V – постоянные, выражение (3) можно записать на временном интервале $\tau < t \leq t_{c1}$ в более простом виде:

$$W = \frac{1}{2} L (I)^2 \lambda, \quad (4)$$

где λ – коэффициент сохранения потока.

При подрыве ВВ (см. рисунок 1) на поверхность внутренней оболочки, обладающей ограниченной прочностью, будет действовать сила F . Под действием этой силы внутренний контур сжимается, увеличивая напряженность магнитного поля, что приводит к увеличению тока в катушке, до величины I_{c2} . Процесс взрывного воздействия на данную структуру будет лежать во временном интервале $t_{c1} < t \leq t_{c2}$. Диапазон изменения тока в данном контуре при подрыве ВВ, можно определить, используя следующее выражение [3]:

$$\frac{I_{c2}}{I} = \alpha \lambda, \quad (5)$$

где I – ток в данном контуре до подрыва ВВ, I_{c2} – ток в контуре на момент времени $t = t_{c2}$, который соответствует максимальному сжатию внутренней оболочки без ее разрыва, под действием взрывчатого вещества. Коэффициент перестройки контура α , с учетом, что индуктивность на интервале времени $t_{c1} < t \leq t_{c2}$ изменяется от первоначальной величины L до значения $L(t_{c2}) = L_{c2}$, запишем следующим образом:

$$\alpha = \frac{L_{c2}}{L} \quad (6)$$

или, учитывая выбранную структуру

$$\alpha = \frac{R_{c2}}{R_o}, \quad (7)$$

где R_o – внутренний радиус цилиндрического лайнера до детонации ВВ; R_{c2} – минимальный внутренний радиус лайнера, предшествующий его разрыву под воздействием ВВ.

Таким образом, для максимального значения тока, с учетом выбранной структуры, можно записать следующее выражение:

$$i(t_{c2}) = I_{c2} = I\lambda \frac{R_o}{R_{c2}}. \quad (8)$$

Закон изменения внутреннего радиуса цилиндрического лайнера под воздействием продуктов детонации ВВ, можно записать следующим образом [3]:

$$R_2(t) = R_o \sqrt{1 - \frac{1}{8} \frac{m}{M} \left(\frac{Dt}{R_o} \right)^2}, \quad (9)$$

где m – масса ВВ, M – масса лайнера, D – скорость сжатия лайнера.

Временная зависимость изменения внутреннего радиуса лайнера при подрыве ВВ представлена на рисунке 2. Данная зависимость построена для стального лайнера с начальным внутренним радиусом равным 6 см. Штриховыми линиями показаны значения внутреннего радиуса лайнера и времени начала образования неустойчивостей, экспериментально полученные в работах [3, 4].

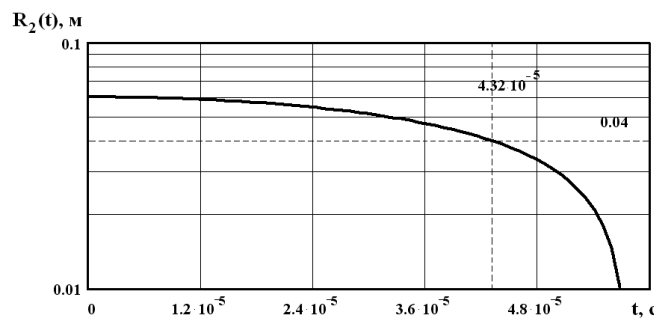


Рисунок 2 – Временная зависимость изменения внутреннего радиуса лайнера под воздействием продуктов детонации ВВ

Основываясь на (9), запишем закон изменения тока, при сжатии цилиндрического лайнера под воздействием подрыва ВВ:

$$i(t) = \frac{I\lambda}{\sqrt{1 - \frac{1}{8} \frac{m}{M} \left(\frac{Dt}{R_o} \right)^2}}. \quad (10)$$

Энергию на данном промежутке времени $t_{c1} < t \leq t_{c2}$, можно определить следующим образом:

$$W = \int_{t_{c1}}^{t_{c2}} \left[\frac{I\lambda}{\sqrt{1 - \frac{1}{8} \frac{m}{M} \left(\frac{Dt}{R_o} \right)^2}} \right]^2 \frac{1}{R_H} dt \quad (11)$$

или

$$W = \frac{I^2 \lambda^2}{\frac{R_H D}{2R_o} \sqrt{\frac{m}{M}}} \ln \left(\frac{\left(\frac{D}{4R_o} \sqrt{\frac{m}{M}} (t_{c2} - t_{c1}) + \left(1 - \frac{1}{8} \frac{m t_{c2} t_{c1}}{M} \left(\frac{D}{R_o} \right)^2 \right) \right)}{\left(\frac{D}{4R_o} \sqrt{\frac{m}{M}} (t_{c1} - t_{c2}) + \left(1 - \frac{1}{8} \frac{m t_{c2} t_{c1}}{M} \left(\frac{D}{R_o} \right)^2 \right) \right)} \right). \quad (12)$$

На рисунку 3 представлена графічеська залежність змінення енергії, передаваної на нагрзуку від значень часу t_{c2} . Данна залежність побудована з урахуванням, що на інтервалі часу $\tau < t \leq t_{c1}$ в вибраній структурі закончився перехідний процес і накоплена первоначальна енергя. Максимальні значення енергії на нагрзку можливі при довготності інтервалу $t_{c1} < t \leq t_{c2}$ більше $30 \cdot 10^{-6}$ с, що визначається механічеськими властивостями металічеського лайнера.

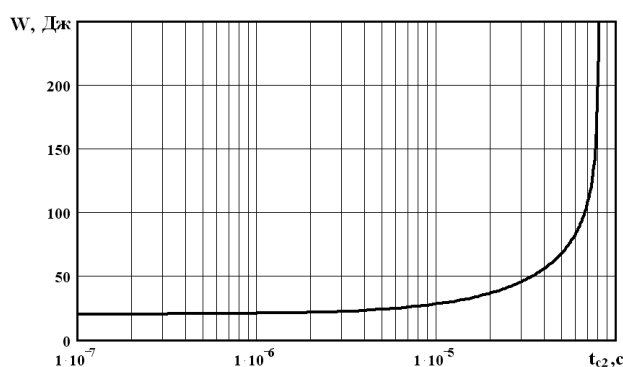


Рисунок 3 – Залежність значень енергії, передаваної на нагрзуку при сжатті лайнера від часу початку утворення нестабільностей на внутрішній поверхності

Аналіз результатів досліджень, проведених в роботах [1–4], показав, що при деформації лайнера представляє інтерес тільки та стадія сжаття, на якій не утворюються нестабільності і внутрішня поверхність залишається циліндричеської форми. Данні нестабільності утворюються і розвиваються із-за різниці в щільності сжимаемого металічеського лайнера і середовища (воздуха), де відбувається деформація. При утворенні і розвитку нестабільностей внутрішня поверхність із циліндричеської переходить в зіркоподібну, що нерідко супроводжується появою тріщин (см. рисунок 4 [3, 4]).

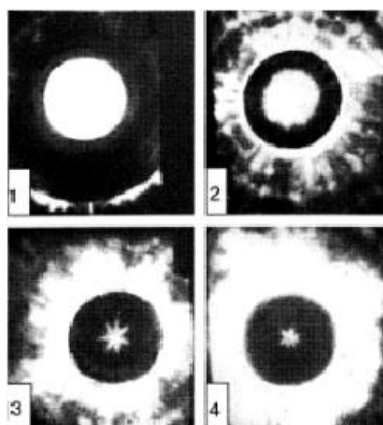


Рисунок 4 – Процес утворення нестабільностей в циліндричеському лайнері (інтервал між знімками $1,6 \cdot 10^{-6}$ с)

В роботі [4], показано, що максимальне сжаття металічеського лайнера без утворення нестабільностей можливо тільки до діаметра в 1,5 меншого первоначального значення (см. таблицю 1).

Таблиця 1 – Експериментальні дані можливого стиснення металічного лайнера, без утворення нестабільностей

Начальний внутрішній діаметр лайнера, мм	Діаметр стисненого лайнера, без утворення нестабільностей, мм	Коефіцієнт збереження потоку
33	20	0,86
45	30	0,91

Аналізуючи вище викладене, необхідно зауважити, що вирази (8)-(11) будуть вірні тільки до моменту утворення нестабільностей на внутрішній поверхні лайнера, т.е.

$$t_{c1} < t \leq t_{c2} \text{ при } t_{c2} < t_{нест}, \tag{13}$$

де $t_{нест}$ – час утворення нестабільностей при стисненні циліндричного лайнера.

Довжина імпульсу, який формується даним генератором, буде залежати від швидкості стиснення циліндричного лайнера на інтервалі часу $t_{c1} < t \leq t_{c2}$.

Висновки. Таким чином, максимальні значення енергії навантаження можливі для тривалостей імпульсу більше $30 \cdot 10^{-6}$ с. Однак, аналіз результатів досліджень, проведених у роботах [3–5], показав, що використання окремих як геофізических, так і радіотехнічних методів можливо лише при тривалостях імпульсного впливу на декілька порядків менших ніж для максимального значення енергії навантаження імпульсного ВМГ. Для збільшення енергії передаваної на високоімпедансну навантаження необхідно використовувати комбіновану конструкцію ВМГ, що включає в себе як елементи імпульсного, так і спірального ВМГ.

Література

- Сахаров А.Д. Взрывомангнитные генераторы / А.Д. Сахаров // Успехи физ. наук. – 1966. – Т. 88. Вып. 4. – С. 725–734.
- Демидов В.А. Высокоиндуктивные взрывомангнитные генераторы с большим коэффициентом усиления энергии / В.А. Демидов, Е.И. Жариков, С.А. Казаков // ПНТФ. – 1981. №6. – С. 106–110.
- Асиновский Э.И. Взрывные генераторы мощных импульсов электрического тока/ Э.И. Асиновский [и др.]; под ред. Фортова В.Е. – М.: Наука, 2002. – 399 с.
- Прищепенко А.Б. Взрывы и волны. Взрывные источники электромагнитного излучения радиочастотного диапазона / А.Б. Прищепенко. – М.: БИНОМ, 2008. – 208 с.
- Кравченко В.И. Электромагнитное оружие / В.И. Кравченко. – Харьков: из-во НТУ «ХПИ». – 2008. – 185 с.

УДК 621.373.7

Тараненко С.В.

ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ В ІМПУЛЬСНОМУ ВИБУХОМАГНІТНОМУ ГЕНЕРАТОРІ

У роботі представлені результати досліджень перетворення енергії в замкнутому контурі імпульсного вибухомангнітного генератора, шляхом виштовхування магнітного поля з об'єма лайнера, з вибуховою речовиною.

Taranenko S.V.

THE ENERGY PERFORMANCE IN PULSE MAGNETIC EXPLOSIVE TYPE GENERATOR

The results of researches related to energy performance in closed circuit of magnetic explosive type generator are presented. The researches were carried out for case of magnetic... pushing out from inside space of ship containing explosive subsistence.