

Кучер Д.Б., Зонтова Т.В., Тараненко С.В., Литвиненко Л.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ СРАБАТЫВАНИЯ СПИРАЛЬНОГО ВЗРЫВОМАГНИТНОГО ГЕНЕРАТОРА ПРИ ВЗРЫВНОМ СЖАТИИ КОНТУРА С ТОКОМ

Введение. В настоящее время в качестве источников питания современных радиоэлектронных систем всё большее применение получили взрывомагнитные генераторы (ВМГ). Наряду с этим существует возможность использования ВМГ как самостоятельного генератора широкополосного излучения. По сравнению с существующими образцами (генераторы СВЧ излучения, источники сильноточных пучков электронов) ВМГ обладает более высокой частотной избирательностью и низкими массогабаритными показателями.

Применение взрывомагнитного генератора в качестве источника мощных электромагнитных излучений (МЭМИ) неразрывно связано с возможностью преобразования энергии в замкнутом контуре. При этом длительность генерируемого импульса зависит от скорости срабатывания ВМГ [1]. Таким образом, целью данной работы является исследование влияния основных параметров спирального ВМГ на скорость его срабатывания и, следовательно, длительность импульса МЭМИ.

Основной материал. Для анализа зависимости длительности импульса, генерируемого ВМГ, от скорости его срабатывания рассмотрим физические процессы, происходящие при взрывном сжатии контура с током (см. рис. 1).

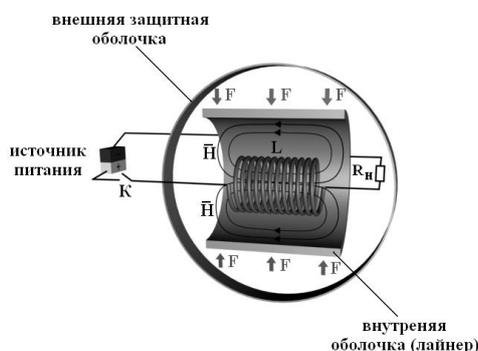


Рисунок 1 – Схема преобразования энергии в ВМГ

Данная структура имеет в своем составе некоторую замкнутую область V , ограниченную прочной защитной оболочкой, в которую помещен соленоид L . 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, а будет нарастать постепенно:

$$i(t) = \frac{\epsilon_0}{R_n} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \tag{1}$$

где $\tau = \frac{L}{R_n}$ – время установления тока.

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 [1]:

$$W = \frac{1}{2} I \int_S \mu H ds = \frac{1}{2} I \Phi. \tag{2}$$

Учитывая, что ток I и объем внутренней области V – постоянные, выражение (2) можно записать на временном интервале $\tau < t \leq t_{c1}$ в более простом виде:

$$W = \frac{1}{2} L(I)^2 \lambda, \quad (3)$$

где λ – коэффициент сохранения потока.

При подрыве взрывчатого вещества (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 $t_{c1} < t \leq t_{c2}$.

Закон изменения тока при сжатии цилиндрического лайнера под воздействием подрыва ВВ имеет вид:

$$i(t) = \frac{I\lambda}{\sqrt{1 - \frac{1}{8} \frac{m}{M} \left(\frac{Dt}{R_o} \right)^2}}. \quad (4)$$

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

$$W = \frac{I^2 \lambda^2}{\frac{R_H D}{2R_o} \sqrt{\frac{m}{M}}} \times \ln \left(\frac{\frac{D}{4R_o} \sqrt{\frac{m}{M}} (t_{c2} - t_{c1}) + \left(1 - \frac{1}{8} \frac{m t_{c2} t_{c1}}{M} \left(\frac{D}{R_o} \right)^2 \right)}{\frac{D}{4R_o} \sqrt{\frac{m}{M}} (t_{c1} - t_{c2}) + \left(1 - \frac{1}{8} \frac{m t_{c2} t_{c1}}{M} \left(\frac{D}{R_o} \right)^2 \right)} \right). \quad (5)$$

На рисунке 2 представлена графическая зависимость изменения энергии, передаваемой на нагрузку, от значений времени t_{c2} . Данная зависимость построена с учетом, что на интервале времени $\tau < t \leq t_{c1}$ в выбранной структуре закончился переходный процесс, и накоплена первоначальная энергия. Максимальные значения энергии на нагрузке возможны при длительности интервала $t_{c1} < t \leq t_{c2}$ более $30 \cdot 10^{-6}$ с, что определяется механическими свойствами металлического лайнера.

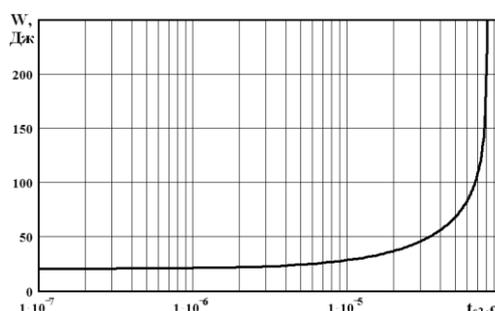


Рисунок 2 – Зависимость значений энергии, передаваемой на нагрузку, при сжатии лайнера от времени начала образования нестабильностей на внутренней поверхности

Анализ результатов исследований, проведенных в работах [2–4], показал, что при деформации лайнера представляет интерес только та стадия сжатия, на которой не образуются нестабильности и внутренняя поверхность остается цилиндрической формы. Данные нестабильности образуются и развиваются из-за разницы в плотности сжимаемого металлического лайнера и среды (воздуха), где происходит деформация.

В работах [2–4] показано, что максимальное сжатие металлического лайнера без образования нестабильностей возможно лишь до диаметра, в 1,5 меньшего первоначального значения.

Длительность импульса, который формируется данным генератором, будет зависеть от скорости сжатия цилиндрического лайнера на интервале времени $t_{c1} < t \leq t_{c2}$. Для достижения максимального эффекта воздействия на радиоэлектронную аппаратуру длительность МЭМИ должна быть как можно меньше, несмотря на уменьшение энергии передаваемой на нагрузку. Поэтому ниже рассмотрим возможность достижения максимальной скорости сжатия лайнера при подрыве ВВ.

Сжатие цилиндрической оболочки лайнера происходит за счет энергии, выделяющейся при детонации ВВ. Очевидно, что для работы ВМГ масса ВВ незначительна, по сравнению как с массой лайнера, так и внешней защитной оболочки [2–4]. Таким образом, при исследовании скорости сжатия лайнера можно в первом приближении пользоваться гипотезой мгновенной детонации [3, 4]. В этом случае максимальную скорость сжатия оболочки одинаковой толщины для заряда цилиндрической формы можно определить из следующей зависимости [3]:

$$W_c + W_k + W_{\Pi} + W_{\Phi} + \frac{Mu^2}{2} = mQ, \quad (6)$$

где u – максимальная скорость сжатия цилиндрической оболочки лайнера, M – масса лайнера, m – масса ВВ, Q – теплота взрывчатого разложения на единицу массы ВВ, W_c – максимальная энергия, которая передается среде (воздуху), окружающей лайнер, W_k – максимальная кинетическая энергия продуктов детонации (ПД), W_{Π} – максимальная внутренняя потенциальная энергия ПД, W_{Φ} – максимальная энергия формоизменения (затрачивается на сжатие лайнера и его последующее разрушение).

Для определения максимальной скорости сжатия лайнера найдем энергии W_c , W_k , W_{Π} , W_{Φ} .

Максимальное значение энергии W_c , передаваемой в ударную волну, распространяющейся в окружающей лайнер среде, может быть определено, основываясь на результатах исследований, проведенных в работах [3, 4]. В этом случае с учетом цилиндрической формы лайнера выражение для W_c можно записать следующим образом:

$$W_c = \pi R_0^2 l p \left(\left(\frac{R_{c2}}{R_0} \right)^2 - 1 \right), \quad (7)$$

где R_{c2} – внутренний радиус лайнера, соответствующий его полному разгону перед появлением нестабильностей и разрывом, R_0 – внутренний радиус цилиндрического лайнера до детонации ВВ, l – длина лайнера (высота цилиндра), p – давление на лайнер со стороны среды, где размещен соленоид (см. рисунок 1).

Для выбранной структуры ВМГ и с учетом незначительного изменения внутреннего радиуса лайнера до возникновения нестабильностей будем считать, что $p = \text{const}$.

Кинетическую энергию ПД W_k можно определить, основываясь на [3, 4] при известной зависимости скорости $v_{\text{пд}}$ и плотности ПД от координаты. Тогда, учитывая, что в выбранной структуре и ВВ, и лайнер имеют цилиндрическую форму, зависимость для кинетической энергии можно записать в следующем виде:

$$W_k = \frac{mv_{\text{пд}}^2}{\psi}, \quad (8)$$

где для цилиндрической структуры $\psi = 2n + 2$; n – числовой показатель.

Из выражения (8) следует, что можно рассматривать энергию W_k как кинетическую энергию определенной массы ПД m_1 , движущейся с постоянной скоростью $v_{\text{пд}}$. Следовательно, для $n = 1$ [3] выражение (8) можно переписать следующим образом:

$$W_k = \frac{m_1 v_{\text{пд}}^2}{2}. \quad (9)$$

Согласно [3], для цилиндрической формы $m_1 = m/2$.

Максимальную величину внутренней энергии ПД можно определить, учитывая [3, 4], следующим образом:

$$W_{\Pi} = me_{\Pi} = m \int_{v_0}^{v_c} p dv, \quad (10)$$

где e_{Π} – внутренняя (потенциальная) энергия единицы массы ПД, v_0 – удельный объем, который занимают ПД до подрыва, v_c – удельный объем, который занимают ПД к моменту максимального сжатия металлического лайнера без образования неустойчивостей.

При изменении удельного объема от $v(t_{c1}) = v_0$ до $v(t_{c2}) = v_c$, если приближенно принять $p = Av^{-k}$ [3], причем $k = \text{const}$, максимальную величину внутренней энергии ПД можно записать, учитывая (10), следующим образом:

$$W_{\Pi} = m \int_{v_0}^{v_c} Av^{-k} dv = \frac{mA}{(k-1)} \left[\frac{1}{v_0^{k-1}} - \frac{1}{v_c^{k-1}} \right], \quad (11)$$

где параметр $A = \frac{c^2}{k\rho_0^{(k-1)}}$ [3], c – скорость звука, ρ_0 – удельная плотность ВВ.

Параметр k и значения удельной плотности для некоторых ВВ представлены в [3, 4].

Для максимальной энергии формоизменения лайнера, основываясь на [4], можно записать следующую зависимость:

$$W_{\Phi} = \frac{M}{\rho_M} \int_0^{\varepsilon_p} \sigma_i d\varepsilon_i = \frac{M}{\rho_M} A_p, \quad (12)$$

где $M/\rho_M = V_M$ – объем лайнера, M – масса лайнера, ρ_M – плотность материала лайнера, A_p – энергия разрушения единицы объема материала лайнера, σ_i и ε_i – интенсивность напряжений и интенсивность деформаций соответственно, ε_p – интенсивность деформаций, соответствующая образованию неустойчивостей и последующего разрушению материала лайнера.

Таким образом, перепишем выражение (6) с учетом (7), (9), (11) и (12) в следующем виде:

$$\pi R_0^2 \rho \left(\left(\frac{R_{c2}}{R_0} \right)^2 - 1 \right) + \frac{mv_{\text{пд}}^2}{4} + \frac{mA}{(k-1)} \left[\frac{1}{v_0^{k-1}} - \frac{1}{v_c^{k-1}} \right] + \frac{M}{\rho_M} A_p + \frac{Mu^2}{2} = mQ. \quad (13)$$

Тогда для максимального значения скорости сжатия лайнера

$$u = \sqrt{2 \frac{m}{M} Q - \frac{2\pi R_0^2 \rho}{M} \left(\left(\frac{R_{c2}}{R_0} \right)^2 - 1 \right) - \frac{mv_{\text{пд}}^2}{2M} - \frac{2mA}{M(k-1)} \left[\frac{1}{v_0^{k-1}} - \frac{1}{v_c^{k-1}} \right] - \frac{2}{\rho_M} A_p}. \quad (14)$$

Учитывая, что слагаемое $\frac{2\pi R_0^2 \rho}{M} \left(\left(\frac{R_{c2}}{R_0} \right)^2 - 1 \right)$ будет намного меньше всех остальных и заменяя $\frac{m}{M} = \beta$, перепишем (14) в следующем виде:

$$u = \sqrt{2\beta Q - \frac{v_{\text{пд}}^2}{4} - \frac{A}{(k-1)} \left[\frac{1}{v_o^{k-1}} - \frac{1}{v_c^{k-1}} \right] - \frac{v_o^*}{m} A_p}, \quad (15)$$

где v_o^* – об'єм лайнера.

Зависимость скорости изменения оболочки лайнеров с различной массой от массы взрывчатого вещества представлена на рисунке 3.

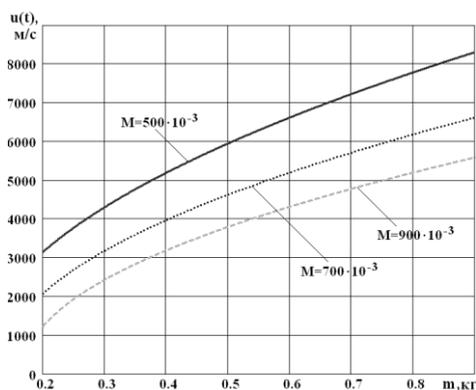


Рисунок 3 – Зависимость скорости формоизменения лайнера с массой M от массы взрывчатого вещества

Таким образом, скорость формоизменения лайнера в зависимости от массы ВВ обеспечит срабатывание ВМГ в микросекундном диапазоне (см. рисунок 3).

Выводы. Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что длительность генерируемого МЭМИ зависит от скорости сжатия металлического лайнера ВМГ. Величина данной скорости, в основном зависящая от физико-химических характеристик лайнера и ВВ, для наилучших условий будет лежать в микросекундном диапазоне.

Литература

1. Тараненко С.В. Преобразования энергии импульсном взрывомагнитном генераторе / С.В. Тараненко // Интегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХПІ», 2009. – № 2. – С. 104–108.
2. Прищепенко А.Б. Взрывы и волны. Взрывные источники электромагнитного излучения радиочастотного диапазона / А.Б. Прищепенко. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 208 с.
3. Физика взрыва / [под ред. Л.П. Орленко]. – М.: ФИЗМАТЛИТ. – Т. 2. – 2004. – 644 с.
4. Одинцов В.А. Расширение и разрушение оболочек под действием продуктов детонации / В.А. Одинцов, Л.А. Чудов; под ред. Г.С. Шапиро. – М.: Мир, 1975. – 132 с.

УДК 621.396.6

Кучер Д.Б., Зонтова Т.В., Тараненко С.В., Литвиненко Л.В.

ДОСЛІДЖЕННЯ МАКСИМАЛЬНОЇ ШВИДКОСТІ СПРАЦЬОВУВАННЯ СПІРАЛЬНОГО ВИБУХОМАГНІТНОГО ГЕНЕРАТОРА ПРИ ВИБУХОВОМУ СТИСКУВАННІ КОНТУРА ІЗ СТРУМОМ

У роботі представлені результати досліджень залежності тривалості імпульсу, що генерується спіральним ВМГ при вибуховому стискуванні контуру із струмом, від швидкості його спрацювання.

Kucher D.B., Zontova T.V., Taranenko S.V., Litvinenko L.V.

RESEARCH OF HIGH SPEED OF WEARING-OUT OF SPIRAL EXPLOSIVE MAGNETIC GENERATOR AT EXPLOSIVE COMPRESSION OF CONTOUR WITH CURRENT

In work the results of researches of dependence of pulse width, generated spiral EMG at the explosive compression of contour with a current from speed of his starting are presented.