

УДК 621.396.6

Д.Б. Кучер¹, С.В. Тараненко¹, А.И. Харланов¹, Ю.М. Бусяк²¹Севастопольский военно-морской институт им. П.С. Нахимова, Севастополь²Харьковское конструкторское Бюро машиностроения им. А.А. Морозова, Харьков

ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРИРОВАНИЯ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ СПИРАЛЬНЫМ ВЗРЫВОМАГНИТНЫМ ГЕНЕРАТОРОМ

В работе показаны конструктивные особенности спиральных взрывомагнитных генераторов. Исследуется зависимость токов на нагрузке от массы взрывчатого вещества и угла расположения витков спирали.

Ключевые слова: электромагнитная помеха, спиральный взрывомагнитный генератор.

Введение

В связи с увеличением функциональной сложности современных радиоэлектронных систем (РЭС), повышением их быстродействия, широким применением в них высокочувствительных элементов вопросы обеспечения стойкости РЭС к воздействию мощных электромагнитных помех (МЭМП) становятся все более актуальными [1, 2].

Основной целью для реализации общих требований и основных мероприятий, направленных на повышение стойкости РЭС к воздействию МЭМП, является достоверность оценки уровней наведенных напряжений и токов на элементах РЭС при воздействии МЭМП и определение оптимальных методов их защиты. В связи с этим одним из актуальных и важнейших направлений исследований представляются источники и методы генерации МЭМП.

В последнее время широкое распространение получили взрывомагнитные генераторы (ВМГ) как генераторы МЭМП разового использования. Принцип их функционирования основан на преобразовании энергии взрывчатого вещества (ВВ) в электромагнитные импульсы высоких амплитуд. В реальных условиях работы каждого ВМГ лежит принцип генерации электромагнитной энергии, мощность которого неизбежно вызовет нарушение функционирования радиоэлектронной аппаратуры. Эффективность при этом повышается при увеличении амплитуды импульса с одновременным уменьшением времени излучения [3].

Поэтому целью данной работы является рассмотрение физических процессов взрывомагнитных генераторов (ВМГ) как одного из существующих источников мощных излучений больших амплитуд и малой длительности.

Основной материал

Таким типом ВМГ может являться структура, показанная на рис. 1. Данная структура включает в себя источник питания, конический соленоид длиной l^* (внешнюю проводящую спираль) и металлический лайнер, заполненный ВВ.

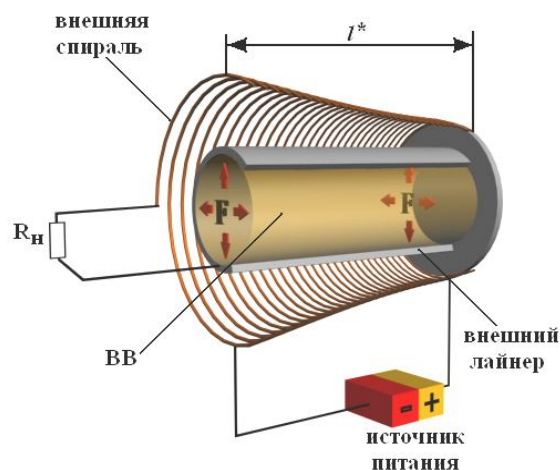


Рис. 1. Спиральный ВМГ

При подрыве взрывчатого вещества на внутреннюю поверхность внешнего лайнера будет воздействовать сила F (рис. 1). В результате данного воздействия контур внешнего лайнера начнет расширяться, замыкая поочередно витки внешней спирали, тем самым, уменьшая индуктивность соленоидов. В соответствии с правилом Ленца, магнитный поток Φ внешней спирали стремится сохраниться неизменным, что при уменьшении индуктивности соленоидов возможно только за счет увеличения напряженности магнитного поля H на незамкнутых витках. Именно данный принцип лежит в основе генерации МЭМИ данной структурой [4 – 6].

Рассмотрим физические процессы, происходящие при работе данного спирального взрывомагнитного генератора (СВМГ). При подключении источника питания начинается переходный процесс, длительность которого определяется величиной временного интервала

$$0 < t \leq \tau_{\text{СВМГ}}, \quad (1)$$

где постоянная $\tau_{\text{СВМГ}} = \frac{L_{\text{СВМГ}}}{R_H}$ – время установления тока; $L_{\text{СВМГ}}$ – индуктивность внешней спирали (рис. 1). При $i(\tau_{\text{СВМГ}}) \approx I$ ток в контуре достигнет предельного значения. После окончания

переходного процесса в данном контуре будет протекать постоянный ток I .

При подрыве ВВ в момент времени t_{c1} – начала расширения лайнера продуктами взрыва (рис. 1) на внутреннюю поверхность лайнера, обладающую ограниченной прочностью, будет воздействовать сила F . Время подрыва ВВ, как и для предыдущего генератора, должно соответствовать условию [3, 5, 6]:

$$t_{c1} \geq \tau_{СВМГ} \cdot \quad (2)$$

Под действием силы F внешний лайнер начинает расширяться, последовательно замыкая витки спирали. Ток, протекающий в данном контуре, с учетом изменяющейся во времени индуктивности спирали имеет следующий вид:

$$i(t) = IR_H \int \frac{1}{L_{СВМГ}(t)} dt \quad (3)$$

Закон изменения индуктивности в процессе расширения лайнера можно записать, учитывая результаты исследований, проведенные в работах [3 – 6], следующим образом:

$$L_{СВМГ}(t) = \frac{\mu_0 N^2(t) \pi r_{cp}^2}{l(t)} K(r_{cp} / l^*), \quad (4)$$

где $N(t)$ – закон изменения количества витков соленоида; $r_{cp} = \sqrt{(r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2)} / 3$ – средний радиус витка соленоида (рис. 2); r_1 и r_2 – радиусы витков соленоида в начале и в конце спирали соответственно; $l(t)$ – закон изменения длины соленоида; $l^* = d \cdot N^* + k$ – первоначальная длина соленоида; d – диаметр проволоки соленоида; N^* – первоначальное количество витков соленоида; k – расстояние между витками; $K(r_{cp} / l^*)$ – поправочный множитель.

Скорость расширения лайнера зависит от характеристик ВВ и определяется следующим образом:

$$U(t) = \frac{dr(t)}{dt} = \frac{mD^2 t}{2M r_0 \sqrt{16 + 2mD^2 t^2 / Mr_0^2}}, \quad (5)$$

где $r(t) = r_0 \sqrt{1 + m / (8M) \cdot (Dt / r_0)^2}$ – закон изменения радиуса цилиндрического лайнера под воздействием продуктов детонации ВВ (r_0 – начальный радиус заряда, m – масса ВВ, M – масса оболочки, D – скорость детонации).

Двигаясь со скоростью $U(t)$ под воздействием продуктов детонации ВВ, внешний лайнер достигает первого витка соленоида с наименьшим радиусом и замыкает его. Далее закон изменение длины внешней спирали, учитывая [4], можно записать следующим образом:

$$l(t) = l^* - U(t) \cdot t / \left(U(t) / D - (r_1 - r_2) / (l^* - d) \right), \quad (6)$$

или, учитывая (5)

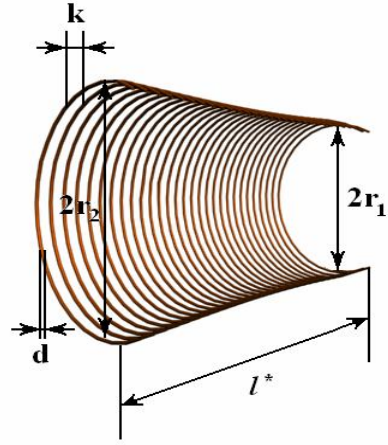


Рис. 2. Конструкционные размеры внешней спирали

$$l(t) = l^* - \frac{mD^2 t^2}{\left(2Mr_0 \sqrt{16 + 2mD^2 t^2 / (Mr_0^2)} \right)} \times \left(\frac{mDt}{2Mr_0 \sqrt{16 + 2mD^2 t^2 / (Mr_0^2)}} - \frac{r_1 - r_2}{l^* - d} \right) \quad (7)$$

Таким образом, в результате взрывного расширения лайнера длина соленоида уменьшается от l^* до $l(t_{c2})$ пропорционально изменению количества его витков.

На рис. 3 представлены графические зависимости изменения длины соленоида от времени для различных масс ВВ.

Анализируя данные зависимости необходимо заметить, что при увеличении массы ВВ в спиральном ВМГ время изменения длины внешней спирали будет увеличиваться. Однако даже при значительных значениях массы ВВ длительность процесса генерации МЭМИ будет лежать в диапазоне десятков микросекунд, что обуславливается механическими свойствами материалов, используемыми в данном типе ВМГ [5].

Основываясь на (5) – (7) запишем выражение, характеризующее изменение количества витков соленоида при последовательном замыкании витков спирали лайнером:

$$N(t) = \frac{l(t) - k}{d} \quad (8)$$

Следовательно, считая $l(t) \gg k$, закон изменения количества витков спирали можно записать следующим образом:

$$N(t) = \frac{l^*}{d} - \frac{mD^2 t^2}{\left(2Mr_0 \sqrt{16 + 2mD^2 t^2 / (Mr_0^2)} \right) \cdot d} \times \left(\frac{mDt}{2Mr_0 \sqrt{16 + 2mD^2 t^2 / (Mr_0^2)}} - \frac{r_1 - r_2}{l^* - d} \right) \quad (9)$$

Перепишем выражение (4) с учетом (7) и (8):

$$L_{\text{СВМГ}}(t) = \frac{\mu_0 \pi r_{\text{ср}}^2 K(r_{\text{ср}}/l^*)}{d^2} \times \left[l^* - \frac{mD^2 t^2}{\left(2Mr_0 \sqrt{16 + 2mD^2 t^2 / (Mr_0^2)} \right)} \right] \times \left[\frac{1}{\left(\frac{mDt}{2Mr_0 \sqrt{16 + 2mD^2 t^2 / (Mr_0^2)}} - \frac{r_1 - r_2}{l^* - d} \right)} \right] \quad (10)$$

Графическая зависимость изменения индуктивности внешней спирали для различных масс ВВ показана на рис. 4.

Учитывая выражение (10), и при $P = \left(mDt - 2Mr_0 \sqrt{16 + \frac{2mD^2 t^2}{Mr_0^2}} \cdot \frac{r_1 - r_2}{l^* - d} \right)$, запишем

закон изменения тока при расширении цилиндрического лайнера под воздействием продуктов детонации ВВ:

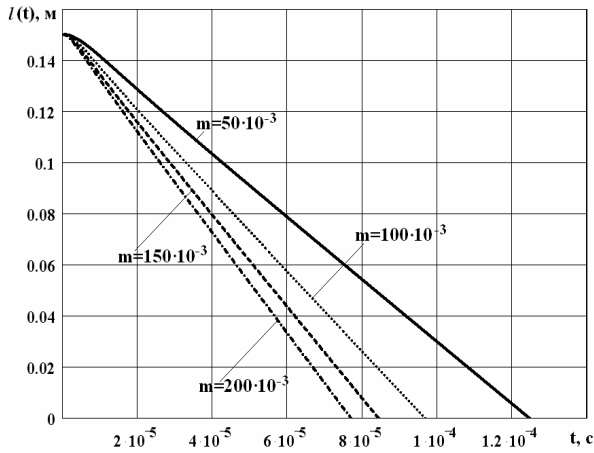


Рис. 3. Временные зависимости изменения длины спирали (соленоида) при подрыве спирального ВМГ для различных масс ВВ

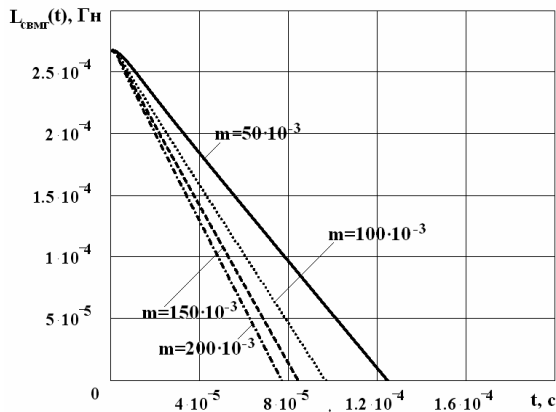


Рис. 4. Временные зависимости изменения индуктивности спирали (соленоида) при подрыве спирального ВМГ для различных масс ВВ

$$i(t) = I R \frac{3d^2}{\mu_0 \pi (r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2) K(r_{\text{ср}}/l^*)} \times \int \frac{P dt}{l^* \cdot P - mD^2 t^2} \quad (11)$$

или

$$i(t) = I R \frac{3d^2}{\mu_0 \pi (r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2) K(r_{\text{ср}}/l^*)} \times \left[\frac{2 \cdot \text{arctgh} \left[\frac{mD(l^* - 2Dt)}{\sqrt{l^* m D^2 (ml^* - 4B(t))}} \right]}{2D \sqrt{l^* m D^2 (ml^* - 4B(t))}} \right] \times \left[\frac{2 \cdot B(t) \cdot D - m \cdot l^* \cdot D - \ln(-mDt l^* - l^* B(t) + mD^2 t^2)}{2D \sqrt{l^* m D^2 (ml^* - 4B(t))}} \right] \times \left[\sqrt{l^* m D^2 (ml^* - 4B(t))} \right] \quad (12)$$

где $B(t) = 2Mr_0 \cdot \sqrt{16 + \frac{2mD^2 t^2}{Mr_0^2}} \cdot \frac{r_1 - r_2}{l^* - d}$.

На рис. 5 представлены временные зависимости тока на нагрузке внешней спирали для различных масс используемого в СВМГ взрывчатого вещества.

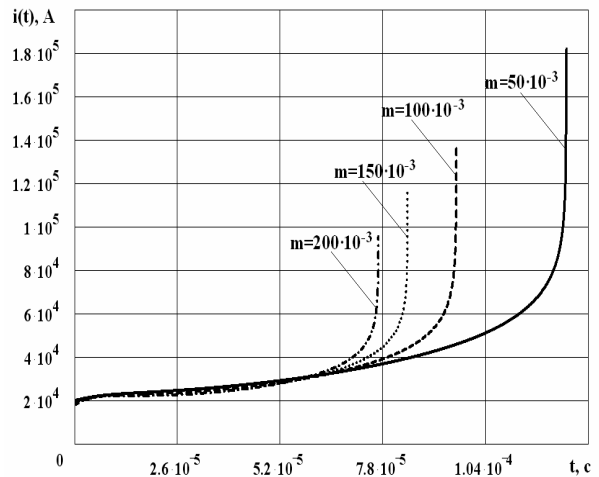


Рис. 5. Временные зависимости тока на нагрузке спирали для различных масс ВВ

Анализируя данные зависимости, необходимо заметить, что с увеличением массы ВВ уменьшается длительность генерируемого МЭМП. Для достижения микросекундной длительности генерируемого импульса масса ВВ должна быть не менее 200 гр. Однако при этом наблюдается некоторое снижение амплитудных значений тока.

Кроме массы ВВ на параметры генерируемого СВМГ излучения не маловажное влияние будет оказывать угол, под которым располагаются витки внешней спирали [5]. Данный угол зависит от соотношения радиусов витков соленоида в начале и конце спирали (см. рисунок 6). Данное соотношение можно определить следующим образом:

$$r_1 = r_2 - l^* \operatorname{tg} \gamma. \quad (13)$$

В этом случае выражение для среднего радиуса спирали будет иметь следующий вид:

$$r_{\text{ср}}^* = \sqrt{\frac{3r_1^2 + 3r_1 l^* \operatorname{tg} \gamma + (l^* \operatorname{tg} \gamma)^2}{3}}. \quad (14)$$

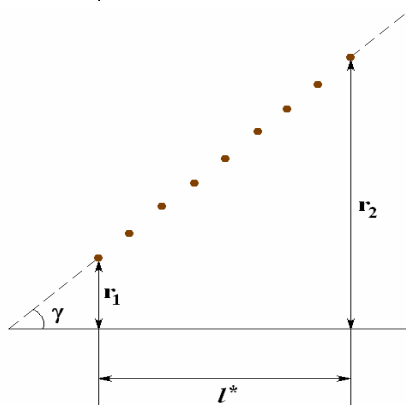


Рис. 6. Соотношение радиусов внешней спирали

Учитывая выражения (13) и (14) перепишем (12) следующим образом:

$$i(t) = \frac{d^2 IR}{\left(3r_1^2 + 3r_1 l^* \operatorname{tg} \gamma + (l^* \operatorname{tg} \gamma)^2\right)} \times \frac{3}{\mu_0 \pi K (r_{\text{ср}} / l^*)} \times \left[\frac{2 \cdot \operatorname{arctgh} \left[\frac{mD(l^* - 2Dt)}{\sqrt{l^* mD^2 (ml^* - 4B(t))}} \right]}{2D \sqrt{l^* mD^2 (ml^* - 4B(t))}} \times \left(2 \cdot B(t) \cdot D - m \cdot l^* \cdot D \right) - \frac{\ln \left(-mDt l^* - l^* B(t) + mD^2 t^2 \right)}{2D \sqrt{l^* mD^2 (ml^* - 4B(t))}} \times \sqrt{l^* mD^2 (ml^* - 4B(t))} \right], \quad (15)$$

где $B(t) = 2Mr_0 \cdot \sqrt{16 + \frac{2mD^2 t^2}{Mr_0^2} \cdot \frac{(l^* \operatorname{tg} \gamma)}{l^* - d}}$.

На рис. 7 представлены временные зависимости тока наводимого на нагрузку СВМГ при подрыве 200 гр. ВВ для различных значений угла расположения витков внешней спирали.

200 гр. ВВ для различных значений угла расположения витков внешней спирали.

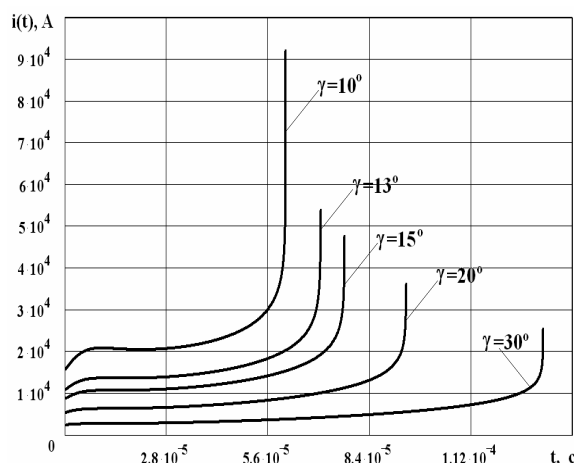


Рис. 7. Временные зависимости тока наводимого на нагрузку СВМГ при подрыве 200 гр. ВВ для различных значений угла расположения витков спирали

Выводы

Таким образом, генерация магнитного поля в СВМГ зависит от тока в последнем витке (нагрузке) при последовательном замыкании всех витков спирали лайнером, который в свою очередь движется под действием силы взрывчатого вещества. Скорость срабатывания напрямую связана с массой ВВ. Немаловажным аспектом, от которого зависит ток нагрузки спирального ВМГ, является угол расположения витков спирали. Оптимальные значения угла расположения витков лежат в интервале $10^\circ \leq \gamma \leq 20^\circ$.

Список литературы

1. Кравченко В.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / В.И. Кравченко, Е.А. Болотов, Н.И. Летунова. – М.: Радио и связь, 1987. – 256 с.: ил.
2. Ефимов И.Е. Радиочастотные линии передачи. Радиочастотные кабели / И.Е. Ефимов, Г.А. Останькович. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Связь, 1997. – 340 с.
3. Павловский А.И. Магнитная кумуляция В кн.: Вопросы современной экспериментальной и теоретической физики. / А.И. Павловский, Р.З. Людаев // Сб. научн. тр. – М.: Наука, 1984. – С. 206-270.
4. Биченков Е. Н. Усиление тока и увеличение энергии в плоских магнитокумулятивных генераторах с диффузией потока / Е.Н. Биченков // ПМТФ. – 1976. – № 6. – С. 121-126.
5. Высокоиндуктивные взрывомагнитные генераторы с большим коэффициентом усиления энергии. / В.А. Демидов, Е.И. Жаринов, С.А. Казаков, В.К. Чернышев // ПМТФ. – 1981. – № 6. – С. 106-111.
6. Физика взрыва / Под ред. К.П. Станюковича. – М.: Наука, 1975. – 704 с.

Поступила в редколлегию 4.06.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

**ОСОБЛИВОСТІ ГЕНЕРУВАННЯ ПОТУЖНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗАВАД
СПІРАЛЬНИМ ВИБУХОМАГНІТНИМ ГЕНЕРАТОРОМ НА РАДІОПРИЙМАЛЬНІ ЗАСОБИ**

Д.Б. Кучер, С.В. Тарасенко, О.І. Харланов, Ю.М. Бусяк

У роботі представлені конструктивні особливості спіральних вибухомагнітних генераторів. Досліджена залежність струмів на навантаженні від маси вибухової речовини та кута розташування витків спірالی.

Ключові слова: електромагнітна завада, спіральний вибухомагнітний генератор.

**PARTICULARITIES OF GENERATE POWERFUL ELECTROMAGNETIC HINDRANCES
SPIRAL EXPLOSIVE MAGNETIC GENERATOR**

D.B. Kucher, S.V. Tarasenko, A.I. Kharlanov, Yu.M. Busyak

Constructive particularities spiral explosive magnetic generator are shown In work. The dependency current is researched on load from mass of the propellants and corner of the location whorl to spirals.

Keywords: electromagnetic hindrance, spiral explosive magnetic generator