

ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ НА ПРОЦЕСС ИЗЛУЧЕНИЯ В СИСТЕМЕ «ВЗРЫВОМАГНИТНЫЙ ГЕНЕРАТОР – ЕМКОСТНАЯ НАГРУЗКА»

В. Г. Барышевский, А. А. Гуринович

Включение взрывомагнитного генератора (ВМГ) в цепь с емкостной нагрузкой вызывает осцилляции в этой цепи, а значит и радиочастотное излучение [3, 4]. Согласно [3], излучение испускается витками индуктора ВМГ, который описывается как спиральная антенна. В настоящем сообщении показано, что емкостная нагрузка также является источником радиационных потерь. Получены уравнения, описывающие процессы в цепи «взрывомагнитный генератор – емкостная нагрузка» с учетом силы радиационного трения [8]. Эта сила сопровождает процесс излучения благодаря появлению зависящей от времени ЭДС в указанной цепи. Показано, что сила радиационного трения существенно влияет на временные характеристики и мощность радиочастотного излучения в такой цепи.

1. Введение

Взрывомагнитные генераторы (ВМГ) широко используются для получения сверхсильных магнитных полей [1, 2]. ВМГ с емкостной нагрузкой (ВМГЕ) также исследовался в качестве возможного источника радиочастотного излучения. В частности, нагрузка ВМГ малой емкостью (100–1000 пФ) была рассмотрена в работе [3]. Согласно [3], индуктор ВМГ выступает в роли спиральной антенны и служит источником радиационных потерь.

В настоящем сообщении показано, в цепи «взрывомагнитный генератор – емкостная нагрузка» радиационные потери, вызванные присутствием емкостной нагрузки, могут существенно влиять на процессы в цепи и должны учитываться при описании.

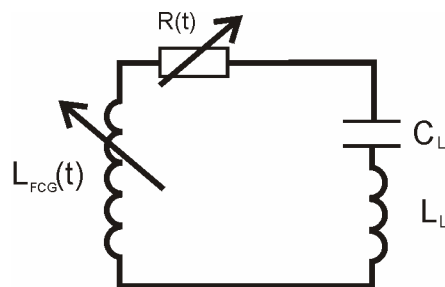


Рис. 1. Эквивалентная схема цепи «взрывомагнитный генератор – емкостная нагрузка»

2. Излучение осциллятора

Эквивалентная схема цепи «взрывомагнитный генератор – емкостная нагрузка» показана на рис. 1, где L_L и C_L – индуктивность и емкость нагрузки, $L_{FCG}(t)$ – индуктивность ВМГ, а $R(t)$ – полное сопротивление цепи, включающее сопротивление ВМГ и все типы потерь.

Такая цепь описывается уравнением

$$\frac{d}{dt}[L(t)J(t)] + R(t)J(t) + \frac{Q(t)}{C_L} = 0, \quad (1)$$

где $L(t) = L_{FCG}(t) + L_L$ – полная индуктивность цепи, $J(t) = \frac{dQ(t)}{dt}$ – ток в цепи, $Q(t)$ – заряд, $R(t)$ – сопротивление ВМГ и все типы потерь. Согласно [3], потери в ВМГ могут рассматриваться как сумма диффузионных потерь, включающая диффузию сжатого магнитного поля в провода и изоляцию, диссипацию энергии из сжимаемого объема, обусловленную излучением от индуктора ВМГ. Для описания всех типов потерь авторы [3] ввели параметр

$$\beta(\tau) = \frac{R(\tau)}{L(\tau)} \tau_L = \nu + \varepsilon e^{S\tau}, \quad (2)$$

где τ_L – типичное время изменения индуктивности ВМГ, $\tau = t/\tau_L$, $R(\tau)$ сопротивление потерь, описывает диффузионные потери ν , а член $\varepsilon e^{S\tau}$ – диссипативные потери ($\varepsilon = const$, $S = const$).

Уравнение (1) можно представить в виде

$$\frac{d^2 Q(t)}{dt^2} + \frac{1}{L(t)} \left(\frac{dL(t)}{dt} + R(t) \right) \frac{dQ(t)}{dt} + \frac{1}{C_L L(t)} Q(t) = 0 \quad (3)$$

то есть

$$\frac{d^2 Q(t)}{dt^2} + \frac{R_{eff}(t)}{L(t)} \frac{dQ(t)}{dt} + \omega^2(t) Q(t) = 0. \quad (4)$$

Поэтому ВМГЭ эквивалентен осциллятору с частотой $\omega(t) = \frac{1}{\sqrt{C_L L(t)}}$ и

эффективным сопротивлением

$$R_{eff}(t) = \frac{dL(t)}{dt} + R(t).$$

Хорошо известно, что меняющиеся во времени заряды и токи являются источником электромагнитного излучения. Сопровождающая процесс излучения сила радиационного трения [8] появляется благодаря возникновению в цепи зависящей от времени электродвижущей силы. Эта сила вызывает затухание колебаний.

Для описания влияния силы радиационного трения на излучение системы, когда типичная длина волны излучения меньше или сравнима с размерами сис-

темы, нужно использовать самосогласованную систему уравнений Максвелла и уравнений движения заряда. Однако для описания излучения системы с длиной волны больше, чем размеры системы, следует использовать мультипольное разложение излучения [8, 5]. Поэтому длинноволновое излучение системы можно описать суммой электрического дипольного, магнитного дипольного и электрического квадрупольного излучения [8, 5].

Характерные значения емкости в этом эксперименте $C_L = 10^{-8} - 10^{-10}$ Ф. Индуктивность изменяется от $L_0 = 10^{-5} - 10^{-3}$ Гн в начальный момент времени до $L_{fin} = 10^{-7}$ Гн [3]. Поэтому характерные длины волн излучения $\lambda = 2\pi c \sqrt{LC_L} = 60 - 6000$ м многократно превосходят размеры системы и радиационные потери следует описывать на основе мультипольного разложения. Итак, рассмотрим дипольное электрическое излучение, источником которого является емкость, и дипольное магнитное излучение, источником которого является индуктор ВМГ.

3. Потери на излучение за счет дипольного электрического излучения

Рассмотрим, как дипольное электрическое излучение, источником которого в основном является конденсатор, влияет на работу ВМГЕ. Согласно [5], мощность излучения электрического диполя определяется выражением

$$P_d = \frac{\mu_0}{6\pi c} \left(\frac{d^2}{dt^2} d(t) \right)^2, \quad (5)$$

где c – скорость света, $d(t)$ – электрический дипольный момент, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м. Излучение электромагнитных волн диполем приводит к появлению самодействия электрического поля электрического диполя [5]

$$E_d = \frac{\mu_0}{6\pi c} \frac{d^3}{dt^3} d(t), \quad (6)$$

поэтому благодаря этому самодействию появляется дополнительная электродвижущая сила:

$$U_d = E_d d_d = \frac{\mu_0 d_d^2}{6\pi c} \frac{d^2 J(t)}{dt^2} = \frac{20 d_d^2}{c^2} \frac{d^2 J(t)}{dt^2}, \quad (7)$$

где d_d – длина диполя и использовано выражение $c \cdot \mu_0 = 120\pi$ Гн/с.

4. Потери на излучение за счет дипольного магнитного излучения

Рассмотрим влияние дипольного магнитного излучения от индуктора ВМГ на поведение осциллятора. Мощность излучения магнитного диполя можно записать [5]:

$$P_m = \frac{\mu_0}{6\pi c^3} \left(\frac{d^2}{dt^2} m(t) \right)^2, \quad (8)$$

где $m(t)$ – дипольный магнитный момент.

Это магнитное излучение индуцирует ЭДС в круговом витке [6]:

$$U_{m1} = \frac{\mu_0}{6\pi c^3} \pi^2 \rho_0^4 \frac{d^4 J(t)}{dt^4} = \frac{\mu_0}{6\pi c^3} S^2 \frac{d^4 J(t)}{dt^4}, \quad (9)$$

где ρ_0 – радиус витка, а S – его площадь. Для индуктора ВМГ, содержащего N последовательно соединенных витков ЭДС может быть записана в виде

$$U_{mN} = \frac{\mu_0}{6\pi c^3} (NS)^2 \frac{d^4 J(t)}{dt^4} = \frac{20}{c^4} (NS)^2 \frac{d^4 J(t)}{dt^4}. \quad (10)$$

Здесь следует учесть, что число витков в индукторе зависит от времени $N = N(t)$.

5. Излучение осциллятора с учетом потерь

Итак, падение напряжения в цепи ВМГЕ складывается из нескольких слагаемых: падение напряжения, вызванное изменением тока $L(t) \frac{dJ(t)}{dt}$, падение напряжения на емкости $\frac{Q(t)}{C_L}$ и обусловленное изменением индуктивности $J(t) \frac{dL(t)}{dt}$, падение напряжения, вызванное диффузионными потерями $R_{dif} J(t)$, а также потерями на дипольное электрическое U_d (7) и магнитное U_{mN} (10) излучения.

В результате уравнение, описывающее осциллятор с учетом затухания, обусловленного потерями на дипольное электрическое и магнитное излучение, можно записать в виде

$$\begin{aligned} & \frac{20N^2 S^2}{c^4 L(t)} \frac{d^5 Q(t)}{dt^5} + \frac{20d_d^2}{c^2 L(t)} \frac{d^3 Q(t)}{dt^3} + \frac{d^2 Q(t)}{dt^2} + \\ & + \frac{1}{L(t)} \left(\frac{dL(t)}{dt} + R_{dif}(t) \right) \frac{dQ(t)}{dt} + \omega^2(t) Q(t) = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Это уравнение содержит производные старше второго порядка. Однако можно показать, что в рассматриваемом случае, когда период колебаний $T = \frac{2\pi}{\omega}$ много меньше характерного времени изменения индуктивности $L(t)$, эти производные можно заменить следующими выражениями:

$$\frac{d^5 Q(t)}{dt^5} = \omega^4(t) \frac{dQ(t)}{dt} \quad \text{и} \quad \frac{d^3 Q(t)}{dt^3} = \omega^2(t) \frac{dQ(t)}{dt}$$

В результате уравнение (11) принимает вид

$$\frac{d^2 Q(t)}{dt^2} + \frac{1}{L(t)} \left(\frac{dL(t)}{dt} + R_{dif}(t) + R_d(t) + R_m(t) \right) \frac{dQ(t)}{dt} + \omega^2(t) Q(t) = 0, \quad (12)$$

где $R_d(t) = \frac{20N^2(t)S^2\omega^4(t)}{c^4 L(t)}$, $R_m(t) = \frac{20d_d^2(t)\omega^2(t)}{c^2 L(t)}$, $\omega^2(t) = \frac{1}{L(t)C_L}$.

Следовательно, чтобы описать токи и напряжения в цепи «взрывомагнитный генератор – емкостная нагрузка», мы должны использовать уравнение для

осциллятора с импедансом в виде, хорошо известном в теории антенн [7], но с зависящими от времени $\omega(t)$, $L(t)$ и $N(t)$.

Эти рассуждения проиллюстрированы на рисунках 2–5. Все кривые получены при следующих параметрах цепи: $L_{FCG}(t=0) = 8 \cdot 10^{-5}$ Гн, $L_{FCG}(t=\tau) = 10^{-7}$ Гн, $\tau = 35$ мкс, $R_{FCG}(t=0) = 0.5$ Ом, $R_{FCG}(t=\tau) = 5 \cdot 10^{-4}$ Ом, $C_L = 10^{-11}$ Ф, $L_L = 2 \cdot 10^{-9}$ Гн.

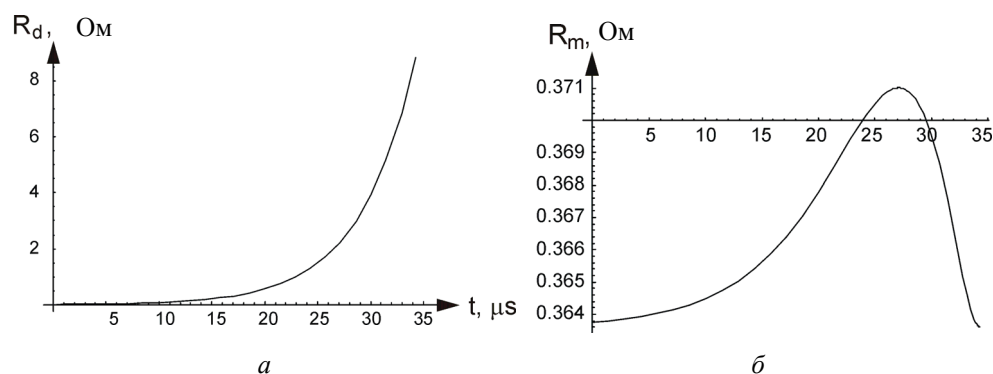


Рис. 2. Сопротивление, описывающее радиационные потери за счет дипольного электрического излучения (а) и дипольного магнитного излучения от индуктора ВМГ (б)

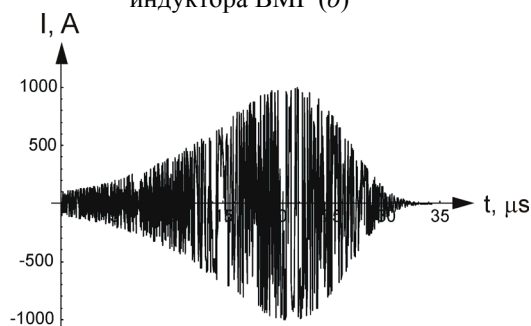


Рис. 3. Ток в цепи ВМГЕ без учета радиационных потерь за счет дипольного электрического излучения, но с учетом магнитных потерь

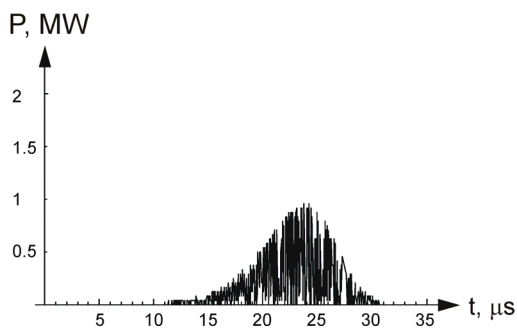


Рис. 4. Мощность излучения ВМГЕ без учета радиационных потерь за счет дипольного электрического излучения, но с учетом магнитных потерь

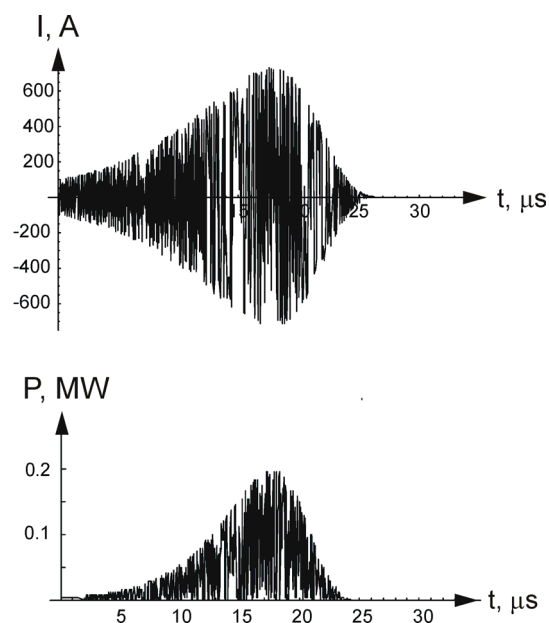


Рис. 5. Ток и мощность излучения с учетом электрических и магнитных потерь

Литература

1. Сахаров А. Д. // УФН. 1966. Т. 88. С. 725.
2. Proc. of Megagauss VII Magnetic Field Generation and Pulsed Power Applications. 1996.
3. Прищепенко А. Б., Щелкачев М. В. // Электричество. 1993. Т. 8. С. 31.
4. Kekez M. M. // Proc. Megagauss-10. 2004. P. 135.
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Классическая теория поля. 1962.
6. Афанасьев Ю. В., Климов В. В. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1992. Т. 101. С. 1118.
7. Schelkunoff S. A., Friis H. T. Antennas: Theory and practice. 1952.
8. Jackson J. D. Classical Electrodynamics, 2nd edition. 1975.

INFLUENCE OF RADIATIVE LOSSES ON THE OSCILLATION PROCESSES IN THE CIRCUIT "FLUX COMPRESSION GENERATOR – CAPACITIVE LOAD"

V. G. Baryshevsky, A. A. Gurinovich

Flux compression generator (FCG) acting on a capacitive load induces oscillations in the circuit "FCG – capacitive load" that causes radio frequency radiation [3, 4]. It is emitted from the loops of FCG coil that can be considered as a helical antenna [3]. In the present paper the capacitive load is shown to be the source of the radiative losses, too. The equations describing operation of the "FCG – capacitive load" circuit in time are obtained considering radiative reaction force [8]. This force accompanies radiation process due to appearing of the time-dependent electromotive force in the above circuit. It is demonstrated that radiative reaction force significantly influences on temporary evolution and power of the RF signal from such a circuit.