

**ВЛИЯНИЕ ОСЕВОГО СМЕЩЕНИЯ ВИТКОВ
НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ ПРОБОЕВ В СПИРАЛЬНОМ ВМГ**

Е. И. Жаринов, О. Д. Михайлов, В. К. Чернышев
(Москва)

Взрывомагнитные генераторы (ВМГ) находят все более широкое применение в физических экспериментах как источники мощных импульсов электромагнитной энергии. Среди известных ВМГ одним из наиболее перспективных и конструктивно простых генераторов, позволяющих усиливать начальную энергию в сотни раз, являются высокоиндуктивные многосекционные генераторы спирального типа [1—4].

В данной работе рассматривается влияние осевого смещения витков под действием поперечных сил магнитного поля на возникновение электрических пробоев в спиральном ВМГ.

Рассмотрим одну из секций спирального ВМГ с постоянной плотностью намотки витков, схематично представленную на фиг. 1, а. Чтобы определить смещение i -го витка под действием радиальной составляющей магнитного поля, составим силовую функцию тока [5], которая в системе единиц Гаусса имеет вид

$$F_i(z) = \frac{d}{dz} \left(\frac{1}{c} \Phi(z) I \right)_{z=z_i},$$

где
$$\Phi(z) = \frac{2\pi\mu}{c} Inr_0 \int_z^{\infty} h_{r_0}(z) dz$$

— полный магнитный поток через цилиндрическую поверхность катушки радиуса r_0 ; I — ток в катушке; $h_{r_0}(z, t) = cH(z, t)/nI$ — безразмерная радиальная составляющая поля; l, n — длина катушки и плотность намотки витков; z_i — координата i -го витка. С учетом функции F_i уравнение осевого движения свободно расположенного i -го витка массой m_i имеет вид

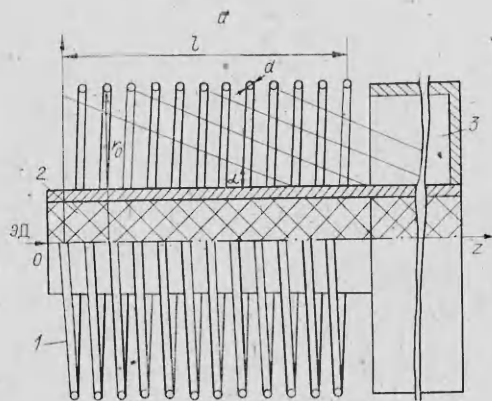
$$m_i \frac{d^2 z_i}{dt^2} = \frac{2\pi\mu r_0 n}{c^2} I^2 h_{r_0}(z_i, t),$$

а само смещение витка определяется выражением

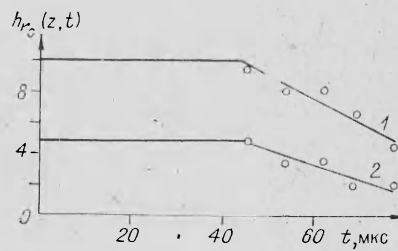
$$z_i = \frac{2\pi\mu r_0 n}{c^2 m_i} \int_0^t dt \int_0^t I^2 h_{r_0}(z_i, t) dt.$$

Так как в спиральном ВМГ из-за конического разлета центральной трубы распределение магнитного поля в рабочем объеме генератора имеет сложную конфигурацию, а численный расчет функции $h_{r_0}(z_i)$ довольно трудоемок, то наиболее простой путь нахождения этой функции состоит в прямых измерениях радиальной составляющей поля H_{r_0} и величины тока I на конкретном генераторе в лабораторных условиях.

Для этой цели был выбран ВМГ (см. фиг. 1, а), состоящий из спиральной катушки 1, центральной трубы с зарядом ВВ 2 и индуктивной нагрузки 3. Геометрические параметры ВМГ следующие: длина и радиус витков катушки $l = 24$ см, $r_0 = 12,6$ см, плотность намотки витков $n = 0,5$ см⁻¹, диаметр медного провода $d = 1,2$ см; центральная труба выполнена из меди и имела наружный диаметр 8,5 см и толщину стенки 1 см. Угол разлета трубы $\alpha = 19^\circ 40'$. Нагрузкой служил коаксиал длиной 50 см.



Ф и г. 1



Ф и г. 2

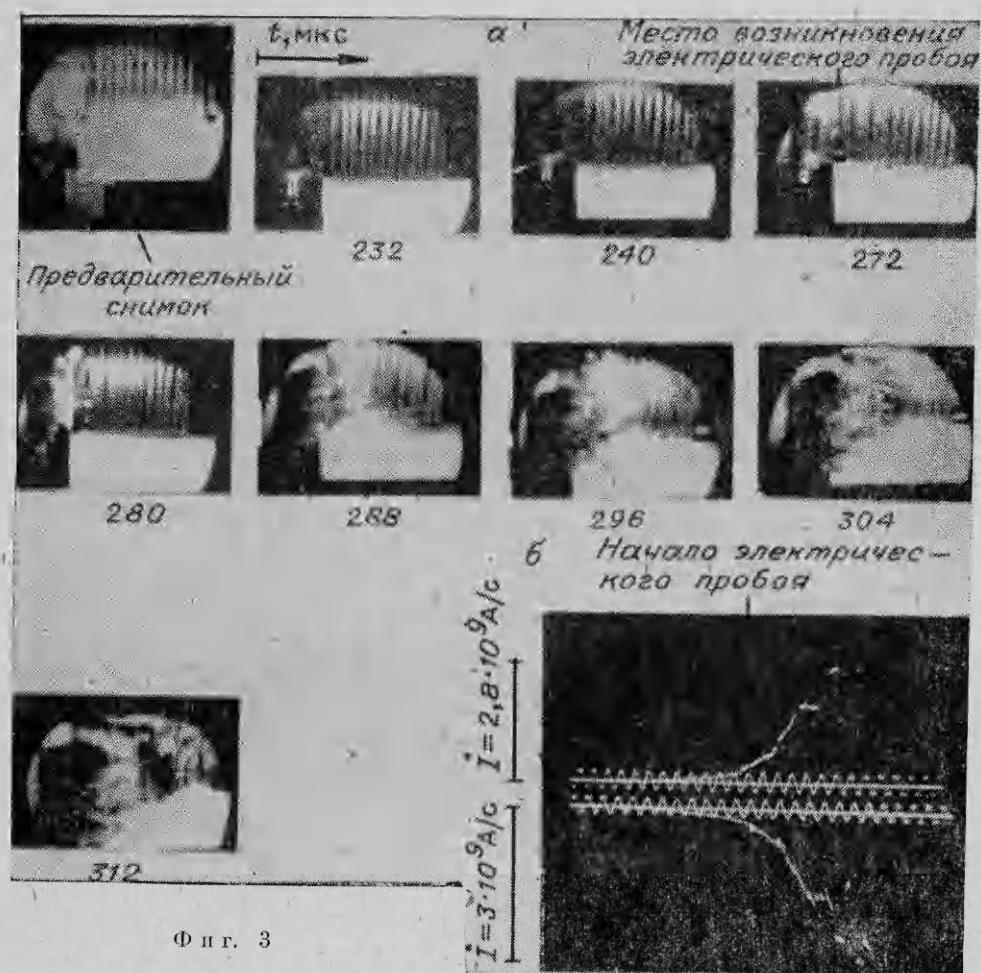
В ходе лабораторных измерений для имитации взрывного разлета стенок центральной трубы во внутрь ВМГ вводился металлический конус с углом при вершине, равным углу разлета центральной трубы.

Распределение магнитного поля вдоль образующей катушки измерялось с помощью дифференцирующих зондов, установленных в зазорах между витками, а величина тока в спирали определялась интегрирующим поясом Роговского. Лабораторные измерения функции $h_{r_0}(z_i)$ для случаев четырех

фиксированных положений конуса, т. е. когда конус контактировал с первым, третьим, шестым и девятым витками спирали (отсчет витков в катушке идет со стороны расположения ЭД), представлены на фиг. 1, б (кривые 1—4 соответственно). По данному семейству кривых определялись временные зависимости $h_{r_0}(z_i, t)$. В частности, для одиннадцатого и двенадцатого витков функции $h_{r_0}(z_i, t)$ изображены на фиг. 2 (соответственно кривые 1, 2). По известной функции $h_{r_0}(z_i, t)$ и ожидаемой кривой тока в генераторе можно рассчитать величину смещения витков.

Для определения влияния осевого смещения витков на возникновение электрических пробоев была проведена серия взрывных экспериментов с генератором, описанным выше. В этих опытах источником начальной энергии служила конденсаторная батарея емкостью 1150 мкФ с зарядным напряжением до 30 кВ (при разряде батареи на ВМГ четверть периода разряда составляла ≈ 240 мкс). Наблюдение за смещением витков, возможным возникновением и развитием электрических пробоев осуществлялось с помощью фотохронографа СФР-2М, работающего в режиме лупы времени. Для повышения качества съемки катушка освещалась двумя взрывными подсветками. Разрядный ток батареи измерялся поясом Роговского, производная тока в ВМГ — дифференцирующими зондами, расположенными в объеме коаксиальной нагрузки. Временная привязка фотохронограммы с осциллограммами осуществлялась по световой вспышке искрового разрядника, момент появления которой соответствовал моменту начала разряда конденсаторной батареи.

Первый взрывной опыт проводился с ВМГ, витки спирали которого были свободно расположены и не имели изоляции. Результаты эксперимента (фотохронограмма и осциллограммы производных тока в ВМГ) приведены на фиг. 3. На фиг. 3, б оба луча — производные тока ВМГ, метки времени 5 мкс. Как видно из фотохронограммы, на 272 мкс после начала разряда КВ между первым и вторым витками катушки возникает электрический пробой локального типа. С течением времени область пробоя расширяется, перерастая затем в сплошной объемный разряд, практиче-



Ф и г. 3

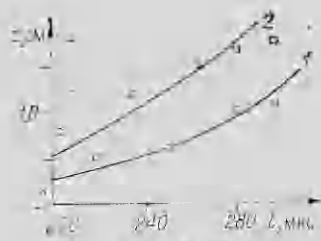
ски охватывающий все внутреннее пространство между трубой и спиралью. Характерно, что с момента появления пробоя на осциллограммах производных тока возникают нерегулярности в виде хаотичных «скачков» и вместо плавного нарастания кривая $I(t)$ приобретает пилообразную форму. Скачкообразное изменение производной тока указывает на наличие в контуре отсечений магнитного потока, которые, как известно, приводят к снижению величины конечного тока. В описанном эксперименте при запитке генератора начальной энергией 150 кДж величина конечного тока составила 800 кА.

Во втором опыте для уменьшения смещения витков энергия запитки была снижена до 65 кДж, а для повышения электропрочности ВМГ витки спирали изолировались лавсановой пленкой толщиной 0,1 мм. Результаты эксперимента приведены на фиг. 4. На фиг. 4, б оба луча — производные тока ВМГ, метки времени 5 мкс. В опыте был зарегистрирован конечный ток 1,2 МА. Следует отметить, что, несмотря на принятые меры, полностью избежать электрических пробоев не удалось. Как видно из фотохронограммы, пробой произошел на конечной стадии деформации контура (298 мкс) между одиннадцатым и двенадцатым витками спирали из-за разрушения изоляции на витках при их столкновении. На фиг. 5 приведено смещение одиннадцатого и двенадцатого витков катушки ВМГ (соответственно кривые 1 и 2, сплошная кривая — расчет, точки — экспериментальные значения).

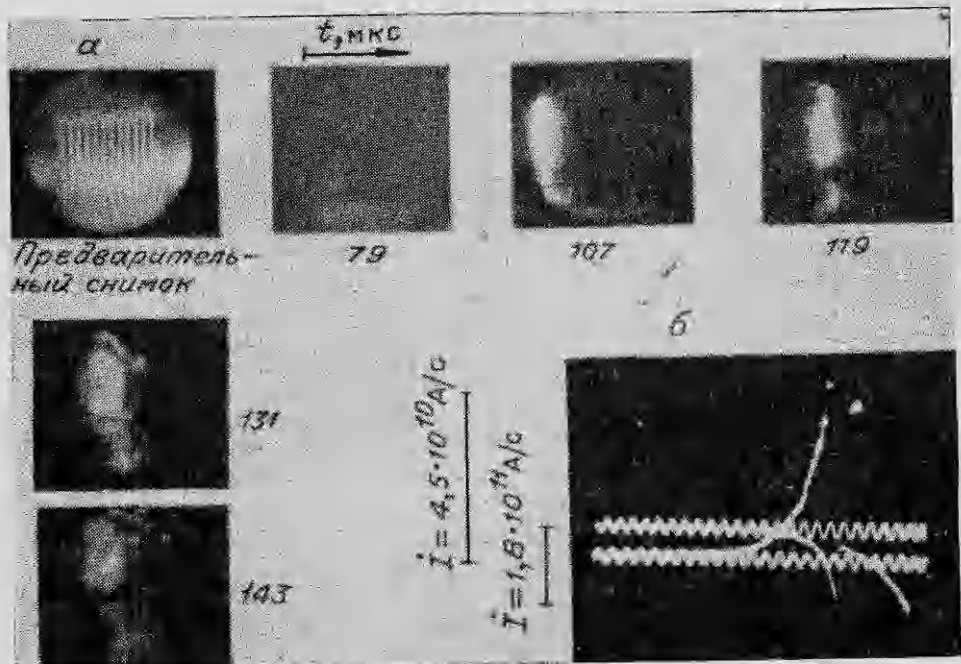
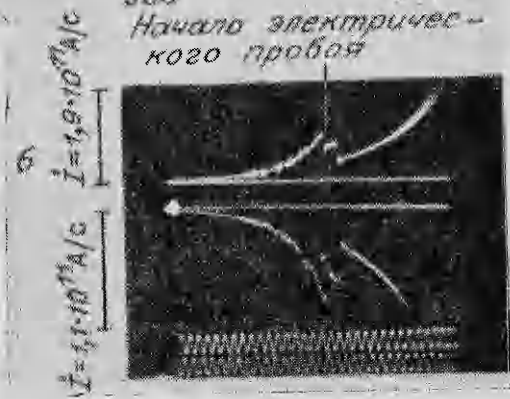
В третьем опыте начальный ток ВМГ и время запитки были установлены такими, чтобы исключить столкновение витков и тем самым не до-



Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6

пустить появления электрического пробоя в рабочем объеме ВМГ. Согласно предварительному расчету, величина начальной энергии должна быть не более 50 кДж, а время ее ввода ~ 60 мкс. При таком условии осевое смещение двенадцатого витка не будет превышать к концу работы ВМГ 2,5 мм. Чтобы точнее зафиксировать начало появления пробоя в катушке в случае его возникновения, взрывные подсветки в этом опыте не применялись. На фиг. 6 представлены результаты эксперимента. На фиг. 6, б оба луча — производные тока ВМГ, метки времени 5 мкс. Электрические пробои в спирали не зарегистрированы. Кривые производных тока нарастают плавно без характерных «скачков». По сравнению с предыдущими генераторами в опыте была получена наибольшая величина конечного тока $\sim 1,4$ МА.

В процессе взрывных экспериментов с ВМГ было установлено, что смещение витков приводит к возникновению электрических пробоев в рабочем объеме ВМГ и снижению величины конечного тока. Электрические пробои удалось ликвидировать за счет уменьшения осевого смещения витков путем снижения величины начального тока и времени его нарастания и введения изоляции на витках. Предпринятые меры позволили в исследуемой конструкции поднять величину конечного тока с 0,8 до 1,4 МА, т. е. в 1,7 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Shearer J. W., Abraham F. F. et al. Explosive-driven magnetic-field compression generators. — Appl. Phys., 1968, vol. 39, N 4.
2. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972.
3. Chernyshev V. K., Zharinov E. I., Demidov V. A., Kazakov S. A. High-inductance explosive magnetic generators with high energy multiplication. — In: Megagauss Physics and Technology. Ed. by P. I. Turchi. N. Y. — L.: Plenum Press, 1979.
4. Pavlovski A. I., Lyudaev R. Z. et al. Formation and transmission of magnetic cumulation generators electromagnetic energy pulses. — In: Megagauss Physics and Technology. Ed. by P. I. Turchi. N. Y. — L.: Plenum Press, 1979.
5. Тамм И. Е. Основы теории электричества. М.: Наука, 1966.

Поступила 11/XI 1983 г.

УДК 537.226 : 536.421 + 536.46

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НЕРАВНОМЕРНО НАГРЕТОГО ДИЭЛЕКТРИКА С СВЧ-ПОЛЕМ

А. Г. Мержанов, В. А. Радучев, Э. Н. Руманов
(Черноголовка)

Используя резкий рост электропроводности с температурой, авторы работы [1] осуществили плавление диэлектрика за счет передачи тепла в твердую фазу из расплава, поглощающего ВЧ-мощность. В [2] рассматривался тепловой режим движения межфазной границы при нагреве расплава постоянным током и при индукционном нагреве. В данной работе исследуется структура тепловой волны, формирующейся в окрестности расплава, при СВЧ-нагреве. Изучено распределение тепловых потоков и полей, определяются предельные значения параметров, при которых еще имеет место тепловая устойчивость области расплава.

1. Если в волноводе с диэлектрическим наполнением * создать участок расплава и подать мощность от СВЧ-генератора, то расплав, поглощая часть этой мощности, будет греться, нагревать соседние слои твердой фазы и плавить их. Таким образом, область расплава распространяется по волноводу навстречу генератору. Вследствие боковых тепловых потерь эта область будет ограниченной. Движение границы расплава по волноводу напоминает распространение газового СВЧ-разряда, исследованное в [3].

* При достаточной диэлектрической проницаемости вещества можно рассматривать просто стержень, который будет представлять собой диэлектрический волновод.