

О.Л. РЕЗИНКИН, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ", Харьков

**ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПЛОСКОМ
СПИРАЛЬНОМ ГЕНЕРАТОРЕ ИМПУЛЬСОВ ВЫСОКОГО
НАПРЯЖЕНИЯ С ФЕРРИМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ**

Запропоновано пласку компоновку спірального генератора імпульсів високої напруги, яка дозволяє виготовляти ізоляцію його обкладинок за класичною конденсаторною технологією. Наведено результати фізичного моделювання електромагнітних процесів у пласкому спіральному генераторі з феритовим осердям та без нього. Проведена оцінка впливу феритового осереддя на вихідний імпульс спірального генератора.

Предложена плоская компоновка спирального генератора импульсов высокого напряжения, которая позволяет изготавливать изоляцию его обкладок по классической конденсаторной технологии. Приведены результаты физического моделирования электромагнитных процессов в плоском спиральном генераторе с ферритовым сердечником и без него. Проведена оценка влияния ферритового сердечника на исходный импульс спирального генератора.

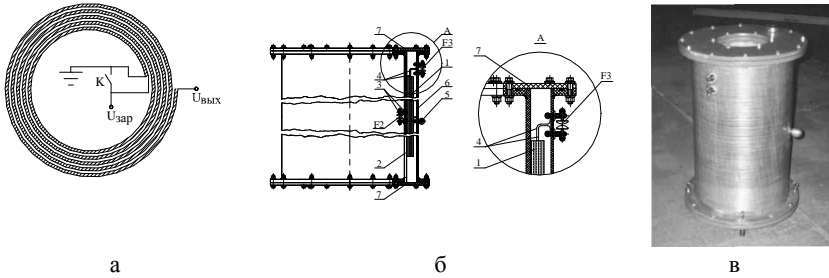
Введение. В высоковольтной импульсной технике известно большое число различных конструкций генераторов импульсов высокого напряжения (ГИН). Каждая из этих конструкций имеет ряд достоинств и недостатков, определяющих область их применения и параметры импульсов, которые могут быть получены на нагрузке. Среди данных конструкций особое место занимает спиральный ГИН [1-4]. Данный тип высоковольтного импульсного генератора характеризуется самой высокой удельной запасаемой энергией среди схем, использующих емкостные накопители энергии. Это объясняется тем, что для работы спирального ГИН практически не требуется каких либо громоздких дополнительных элементов, предназначенных для обеспечения режима его заряда и запуска, а коммутация осуществляется при помощи единственного искрового разрядника. К преимуществам данного генератора относятся также простота компоновки и возможность умножения напряжения в десятки раз. К недостаткам следует отнести необходимость использования малоиндуктивного быстродействующего высоковольтного коммутатора, относительно невысокий коэффициент использования ГИН по напряжению и небольшую выходную ем-

кость (последнее, впрочем, является лишь естественным следствием высокого коэффициента умножения напряжения).

Особенности конструктивных исполнений спиральных ГИН.

Классической компоновкой спирального ГИН является его цилиндрическое исполнение, при котором полосковую линию, образованную парой фольговых обкладок, разделенных пленочной изоляцией, наматывают на трубу из электроизоляционного материала в виде спирали (рис. 1а, б, в). В результате намотки внешние поверхности обкладок образуют так называемую пассивную линию, а внутренние – активную (показана на рис. 1а штриховкой). Емкость, образованная парой обкладок, заряжается до напряжения $U_{\text{зар}}$ и затем замыкается накоротко при помощи ключа К, расположенного на одном из краев или в середине активной линии. Замыкание ключа приводит к возникновению и распространению вдоль активной линии волн спада напряжения. По мере продвижения волн, емкости, образованные смежными витками спирали включают последовательно. Когда падающие волны достигают концов спирали, активная линия оказывается полностью разряженной, а пассивная остается заряженной, вследствие чего напряжение между началом и концом спирали возрастает до величины $U_{\text{вых}} = n\beta U_{\text{зар}}$, где n – количество витков спирали, β – коэффициент использования ГИН по напряжению. Распространение по активной линии спада напряжения от $U_{\text{зар}}$ до нуля эквивалентно распространению по ней волны обратной полярности с амплитудой $-U_{\text{зар}}$ при ненулевых начальных условиях $U(0) = U_{\text{зар}}$. После достижения волнами разомкнутых концов активной линии на них возникают отраженные волны, также имеющие амплитуду $-U_{\text{зар}}$. В момент, когда отраженные волны достигают ключа, процесс перезарядки активной линии до напряжения $-U_{\text{зар}}$ оканчивается и напряжение на нагрузке, подключенной к выходу ГИН, достигает максимальной величины $U_{\text{вых}} = 2n\beta U_{\text{зар}}$. Далее процесс отражения волн повторяется до тех пор, пока вся энергия не поглотится в нагрузке или не будет рассеяна вследствие потерь.

Описанная компоновка спирального ГИН не является единственно возможной. Так, например, известна конструкция [4], в которой активная и пассивная линии имеют форму двух вставленных друг в друга трехмерных спиралей, образованных вырезанными из фольги кольцами с радиальными разрезами, сложенными внахлест друг на друга вместе с разделяющими их слоями пленочной изоляции. Схема расположения обкладок, образующих линии данного спирального ГИН, показана на рис. 2, а принцип его работы аналогичен описанному выше.



1 – изолированные спиральные обкладки 2, 6, 7 – элементы маслонаполненно-го изоляционного корпуса; 3, 4 – электроды коммутирующих разрядников; 5 – выходной высоковольтный вывод

Рис. 1 Спиральный генератор импульсов высокого напряжения: а – схема обкладок активной и пассивной линий; б – основные элементы конструкции; в – внешний вид.

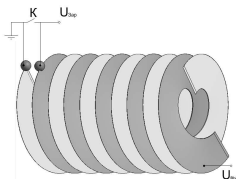
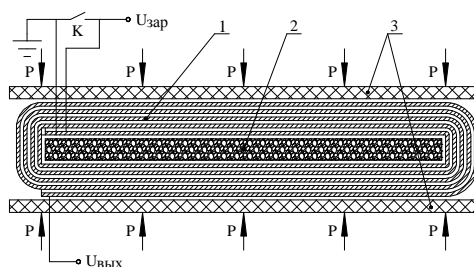


Рис.2 Спиральный ГИН аксиальной компоновки.

Обе упомянутые компоновки спирального ГИН предполагают наличие значительного объема свободного объема, заключенного внутри спиральных обкладок, существенно увеличивающего габаритные размеры устройства в целом. Наличие этого объема обусловлено необходимостью индуктивной развязки витков спирали друг относительно друга. Действительно, поскольку начало и конец каждого из витков спирали соединяет смежные с ним витки как активной, так и пассивной линий, отсутствие значительного индуктивного сопротивления этого витка фактически означало бы его короткое замыкание и, следовательно, исключение из процесса трансформации напряжения. Между тем еще изобретатели спирального ГИН [1, 2] отмечали возможность увеличения развязывающей индуктивности витков спиральных обкладок за счет применения ферромагнитного сердечника, размещенного внутри его обмотки.

Физическое моделирование позволило проверить возможность практической реализации компоновки спирального ГИН в виде плоской электромагнитной системы с ферромагнитным сердечником (рис. 3). Активная линия на рис. 3 для наглядности заштрихована, а изоляция активной и пассивной линий, высоковольтные малоиндуктивные токоподводы ключа К, высоковольтный выходной вывод и силовые элементы конструкции не показаны. Конструкция и технология изго-

товления пакета 1, составленного из фольговых обкладок линий и их пленочной изоляции, в данном случае позволяет применять хорошо апробированные решения, используемые при изготовлении мотаных конденсаторных секций. Данная компоновка позволяет существенно (более чем на порядок) сократить один из габаритных размеров генератора, повысить ресурс и надежность изоляции его обкладок и дает ряд технологических преимуществ, облегчающих его изготовление.



1 – пакет, намотанный из слоев фольг и изоляции; 2 – ферромагнитный сердечник; 3 – диэлектрические пластины; P – распределенная механическая нагрузка

Рис 3 Конструкция спирального ГИН плоской компоновки.

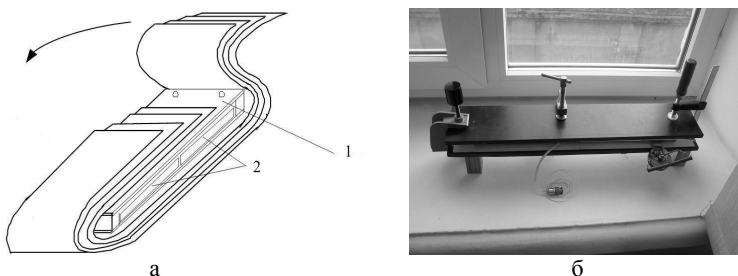
В частности, в случае цилиндрической формы спирального ГИН (рис. 1), обмотка, состоящая из обкладок и изоляции, получается рыхлой, содержащей значительное количество воздушных, а после пропитки – масляных полостей. Данный недостаток обусловлен тем, что в процессе намотки затягивающие усилия ограничены прочностью на разрыв фольг и слоев изоляции, образующих линии ГИН. При попытке обжатия пакета цилиндрического ГИН после намотки, в пакете образуются складки, вызывающие неоднородность волнового сопротивления активной и пассивной линий, а также значительно снижающие электрическую прочность их изоляции. Данные технологические недостатки приводят с одной стороны к снижению эффективности умножения напряжения (практически удается получить значение коэффициента использования ГИН по напряжению $\beta \leq 0,7$) и, с другой стороны, приводят к необходимости снижения величины $U_{зар}$ на 20÷30 % по сравнению с его расчетным значением. Применение плоской конструкции ГИН (рис. 3) позволяет проводить опрессовку пакета 1 после его намотки при помощи пары диэлектрических пластин 3. В результате удастся достичь плотного и однородного прилегания слоев фольг и

изоляции друг к другу и, как следствие, значительного улучшения геометрических параметров линий, образующих ГИН.

В качестве рабочего диэлектрика линий целесообразно использовать комбинированную бумажно-пленочную изоляцию с вакуумной пропиткой конденсаторным маслом. Чередование слоев конденсаторных пленок и бумаг позволяет добиться полной пропитки пакета 1 по всей его ширине. Для обеспечения требуемой величины индуктивности витков спиральной линии вовнутрь секции помещается магнито-диэлектрический сердечник 2, набранный, например, из пластин магнитомягкого феррита, компаундированного карбонильного или распыленного железа (в зависимости от требуемых амплитудных и частотных параметров ГИН).

Описание физической модели. Экспериментальное исследование работоспособности предлагаемой конструкции спиральной генератора проведено путем физического моделирования его работы на пониженном напряжении. Конструкция физической модели соответствует рис. 3, а схема намотки пакета изоляционных и фольговых лент представлена на рис. 4. Намотка спиральной линии выполнялась на изоляционный каркас 1 с габаритными размерами $410 \times 50 \times 12$ мм. Стенки каркаса выполнены из стеклотекстолита толщиной 1 мм. В качестве ферромагнитного сердечника 2 использованы четыре стержня из феррита M2000HM $200 \times 25 \times 10$ мм, уложенные между стенками каркаса вплотную друг к другу. Спиральная линия наматывалась на прямоугольный каркас вдоль его большей стороны таким образом, чтобы ферриты можно было извлекать из каркаса без ее перемотки. Состав пакета, представляющего собой полосковую систему из двух изолированных обкладок, следующий: ПФПППФПП, где Ф – ленты шириной $a = 50$ мм из алюминиевой фольги толщиной 40 мкм, П – ленты шириной 75 мм из лавсана толщиной 25 мкм. Таким образом, ширина краины пакета составила 12,5 мм. Намотка линии производилась вручную с непрерывной укладкой каждого из слоев пленки и фольговых обкладок, предварительно намотанных на отдельные катушки. Такая технология намотки позволила избежать сминания слоев фольги и пленки, вызванного различием их длин, необходимых для укладки пакета вокруг торцов каркаса. Общее число витков пакета составило $N = 18,5$, что соответствует длине образованных фольговыми обкладками активной и пассивной линий $l = 15,8$ м. Толщина намотки при этом составила 4,5 мм с каждой из плоских сторон системы, а расстояние между серединами пакета, расположенными по разные стороны от каркаса, $b = 16,5$ мм (рис. 4,а). В начале намотки к фольговым обклад-

кам подключены выводы из медной фольги толщиной 50 мкм для подключения быстродействующего закорачивающего коммутатора.



1 - изоляционный каркас; 2 - ферромагнитный сердечник; 3 - ленты из алюминиевой фольги; 4 - изоляция из лавсана

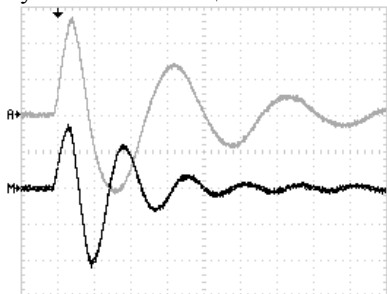
Рис. 4. Физическая модель спирального ГИН плоской компоновки.
а – схема намотки пакета; б – внешний вид модели.

После намотки модель была обжата при помощи двух гетинаксовых щек и струбцин (рис. 4,б). Давление щек на пакет практически полностью передается ферритовому сердечнику (рис. 3, 4), поэтому для предупреждения его растрескивания величина этого давления не должна превышать $P \leq 5 \cdot 10^5$ Па. После затяжки струбцин зарядная емкость модели составила $C_{зар} = 0,55$ мкФ. В качестве закорачивающего коммутатора использован металлокерамический отпаянный газонаполненный тригатрон с коаксиальным расположением управляющего электрода РТ-53. Данный разрядник позволяет коммутировать модель спирального ГИН при зарядных напряжениях $U_{зар} = 0,6-1,6$ кВ.

Конструкция физической модели позволяет извлекать из изоляционного каркаса (1 рис. 4,а) ферритовые стержни и заменять их диэлектрической пластиной, имеющей те же габаритные размеры, что и сердечник. Это дает возможность непосредственно наблюдать влияние сердечника на работу спирального генератора плоской компоновки. Индуктивность спиральных фольговых обкладок, измеренная при вставленной диэлектрической пластине, составила $L_d = 41$ мкГн.

Результаты физического моделирования. На рис. 5 представлены осциллограммы напряжения на выходе модели спирального ГИН при наличии А и отсутствии М ферритового сердечника. Измерения выходного напряжения модели ГИН выполнены при помощи высоковольтного емкостно-омического делителя напряжения с входной емко-

стью 30 пФ и сопротивлением 10 МОм. Регистрация выходных сигналов емкостно-оммического делителя проведена при помощи цифрового запоминающего осциллографа Tektronix TDS1012 с полосой пропускания 100 МГц и максимальной частотой дискретизации 1 ГГц.



А – при наличии сердечника из феррита М2000НМ; М – при отсутствии сердечника

Рис. 5. Осциллограммы напряжения на выходе модели спирально-го ГИН, 500 нс/дел, 12,8 кВ/дел.

ГИН, вызывающее импульсное намагничивание ферромагнитного сердечника. Как видно из осциллограмм, по крайней мере в течение первого периода эти колебания не монохроматичны. Частота возбуждаемых колебаний стабилизируется после окончания первого их периода и отличается в двух рассматриваемых случаях примерно вдвое ($f_f = 0,63$ МГц при наличии ферритового сердечника и $f_d = 1,3$ МГц при его отсутствии). Данный эффект объясняется увеличением эквивалентной индуктивности фольг $L_{\text{эв}}$ при наличии внутри обмотки материала с высокой магнитной проницаемостью. Кроме того при использовании ферромагнитного сердечника наблюдается существенное повышение выходного напряжения ГИН (23 кВ при наличии сердечника и 14 кВ при его отсутствии), что свидетельствует об эффективности его использования для улучшения индуктивной развязки смежных витков спиральных лент. Очевидно, полученный уровень частоты f_f является приемлемым для использования феррита М2000НМ в качестве материала сердечника спирального генератора импульсного напряжения плоской компоновки. Снижение добротности данной колебательной системы при введении ферритового сердечника с $Q_d = 3,1$ до $Q_f = 2,0$ связано, по-видимому, с потерями при импульсном намагни-

Из приведенных осциллограмм видно, что импульс напряжения на выходе модели в обоих случаях имеет колебательный характер. Данные колебания обусловлены индуктивностью, образованной витками фольговых лент, из которых намотаны линии спирального генератора, а также емкостью этих фольг друг относительно друга. Описанный выше процесс умножения напряжения на витках спирали приводит к возникновению высокого напряжения на выходе ГИН и возбуждает колебания токов в фольгах. Эти токи создают магнитное поле в средней части

чивании феррита. В случае изменения напряженности или частоты магнитного поля, создаваемого импульсными токами спиральных обкладок, для обоснованного выбора материала магнитодиэлектрического сердечника потребуются проведение дополнительных исследований. Оценка соответствия значения эквивалентной емкости спирального генератора $C_{\text{экв}}$ в режиме возбужденных колебаний при отсутствии ферромагнитного сердечника формуле Томсона

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \sqrt{1/(L_{\text{экв}} \cdot C_{\text{экв}})}, \text{ где } L_{\text{экв}} = L_d, \text{ показало, что ее величина, со-}$$

ставляющая $C_{\text{экв}} = 340$ пФ, не совпадает ни с зарядной емкостью $C_{\text{зар}} = 0,55$ мкФ, ни с емкостью спирального ГИН в ударе [2] $C_{\text{уд}} \approx C_{\text{зар}}/(2N)^2 \approx 400$ пФ. Таким образом, схема замещения спирального ГИН при рассмотрении возникающих в нем колебаний не может быть представлена единственным контуром, включающим в себя взаимную емкость обкладок, либо их продольную емкость, а также их эквивалентную индуктивность и активное сопротивление. Это связано, по-видимому, с шунтирующим влиянием емкостей отдельных витков спиралей и их взаимной индуктивностью.

Следует отметить, что режим возбужденных колебаний традиционно не рассматривается как основной рабочий режим спирального ГИН. В литературных источниках [1-4] рассматривается работа спирального генератора лишь в процессе умножения напряжения при распространении волн в его активной линии. Тем не менее, понимание процессов, возникающих при работе спирального генератора в режиме возбужденных колебаний чрезвычайно важно при разработке конструкции его изоляции. Кроме того, возможно использование возникающих в этом режиме эффектов в практических целях. Так, например, из приведенной на рис. 5 осциллограммы напряжения на выходе физической модели при отсутствии в ней ферритового сердечника видно, что амплитуда второй (отрицательной) полуволны выше, чем первой. Данный эффект был нами также обнаружен при регистрации выходных импульсов спирального ГИН цилиндрической компоновки с выходным напряжением 800 кВ, приведенного на рис. 1,б,в. Включение последовательно с данным ГИН искрового разрядника, настроенного на пробивное напряжение выше первой полуволны, но ниже второй позволило увеличить напряжение на нагрузке на 15 % или уменьшить на ту же величину зарядное напряжение.

Оценочные расчеты импульсного магнитного поля спирального ГИН показывают, что при работе на максимальных зарядных напряжениях в данной конструкции все известные магнитодиэлектрики ра-

ботаю за пределами своих номинальных эксплуатационных режимов. Поведение магнитодиэлектриков в полях, отличных от номинальных, часто бывает не документированным. Как известно, магнитная проницаемость ферро- и ферромагнетиков существенно падает при превышении границ номинальных частотных и амплитудных диапазонов приложенных к ним магнитных полей.

Сложность адекватного описания при помощи схем замещения, неопределенность влияния импульсных характеристик магнитодиэлектрического сердечника и недостаточная исследованность импульсного магнитного поля внутри витков спиральных линий делает актуальным дальнейшее исследование спирального генератора плоской компоновки методом физического моделирования.

Выводы. Предложенная компоновка спирального ГИН позволяет добиться следующих преимуществ по сравнению с классическими конструкциями, описанными в литературе:

- один из габаритных размеров ГИН может быть уменьшен приблизительно на порядок;

- однородность волнового сопротивления активной линии повышается из-за отсутствия складок и замытий обкладок и их изоляции при намотке, а также за счет возможности равномерной опрессовки намотанной линии;

- технологичность сборки устройства становится существенно выше; появляется возможность использования технологических приемов, и оборудования используемых при изготовлении и пропитке мотаных конденсаторных секций.

К недостаткам предложенной компоновки спирального ГИН можно отнести сложность расчета его конструкции из-за неопределенности свойств материала магнитодиэлектрического сердечника в режимах, отличных от номинального.

Список литературы: 1. *Fitch R.A. and Howell V.T.S.*, Novel Principle of Transient High-Voltage Generation, Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, Science and General, Apr. 1964, pp. 849-855, vol. 111, No. 4, The Institution of Electrical Engineers, UK. 2. Patent USA 3289015. Pulse generator. Cl. 307-110 / *Fitch R.A., Howell V.T.* – Nov. 29, 1966. – 9 p. 3. *Кремнев В.В., Месяц Г.А.* Методы умножения и трансформации импульсов в сильноточной электронике. – Новосибирск: Наука, 1987. – 226 с. 4. *Козлов М.И.*, Высоковольтный импульсный генератор // ПТЭ. – 1973. – № 5. – С. 106-108.

*Поступила в редколлегию 13.12.2010
Рецензент д.т.н., проф. Рудаков В.В.*