

О. Л. РЕЗИНКИН, канд. техн. наук, докторант, НТУ «ХПИ»

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ СПИРАЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА ИМПУЛЬСОВ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Наведені результати експериментального дослідження магнітних полів фізичних моделей спіральних генераторів імпульсів високої напруги пласкої та циліндричної конструкції. Досліджений вплив феритового осереддя на вихідну напругу та параметри імпульсного магнітного поля спірального генератора у режимі збуджених вільних коливань.

The results of magnetic fields physical modeling for spiral high voltage pulsers with cylindrical and flat configuration are represented. Influence of ferrite core presence on output voltage and parameters of pulsed magnetic field of spiral pulser in free oscillations regime is investigated.

Введение. Спиральный генератор импульсов высокого напряжения (ГИН) [1, 2] характеризуется самой высокой удельной запасаемой энергией и коэффициентом умножения напряжения среди схем, использующих емкостные накопители энергии (ЕНЭ). В его конструкции отсутствуют элементы, предназначенные для обеспечения электрической развязки конденсаторов в режимах его зарядки и запуска, а коммутация осуществляется при помощи единственного искрового разрядника, что выгодно отличает спиральный ГИН от классической схемы Маркса и от других известных устройств на ЕНЭ [2,3]. Высокие удельные характеристики, достижимые при использовании трансформации напряжения спиральным ГИН, делают перспективным его использование в мобильных и портативных высоковольтных импульсных устройствах, находящих применение в составе современной испытательной и специальной техники.

При срабатывании спирального ГИН в электромагнитной системе, образованной распределенной емкостью и индуктивностью спиральных обкладок, образующих активную и пассивную линии, возникают свободные затухающие колебания, генерирующие магнитное поле как в элементах конструкции ГИН, так и в окружающем его пространстве. Это импульсное поле с одной стороны оказывает влияние на ход электромагнитных процессов в обкладках и магнитопроводе [4] самого спирального генератора, и с другой стороны - способно повлиять на электромагнитную совместимость данного генератора с находящимися поблизости с ним техническими объектами. Расчетная оценка параметров данного поля не всегда возможна и как правило нуждается в экспериментальной проверке, поэтому актуальной является задача физического моделирования магнитного поля спирального ГИН.

Магнитное поле спирального ГИН цилиндрической компоновки. Наиболее широко в литературе описана цилиндрическая компоновка спирального ГИН (рис. 1, *a*), при которой его пассивная и активная линии (последняя на рисунке заштрихована) образованы парой фольговых обкладок, разделен-

ных пленочной изоляцией, совместно намотанных в виде спирали Архимеда на трубчатый электроизоляционный каркас. Принцип действия данного ГИН описан, например, в книге В.В. Кремнева и Г.А. Месяца [3].

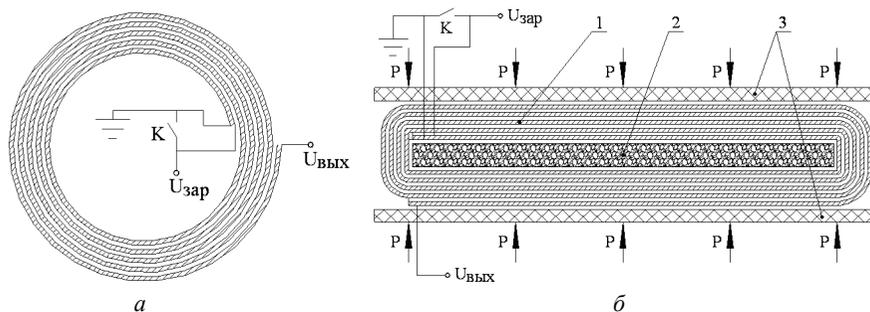


Рисунок 1 – Спиральный генератор импульсов высокого напряжения: *а* – цилиндрической компоновки; *б* – плоской компоновки (1 – активная и пассивная спиральные линии; 2 – ферромагнитный сердечник; 3 – диэлектрические пластины)

Данная компоновка является наиболее простой с точки зрения экспериментального и теоретического исследования параметров ее магнитного поля. На этапе трансформации напряжения магнитное поле электромагнитных волн, возникающих и распространяющихся в активной линии спирального ГИН, сосредоточено между ее обкладками. Магнитный поток этого поля замыкается симметрично относительно их плоскости симметрии, и напряженности поля, создаваемые отдельными фольгами активной линии практически полностью взаимно компенсируются. Импульсное высокое напряжение, возникающее при этом между выходными выводами генератора, возбуждает свободные затухающие колебания в электромагнитной системе, образованной распределенными емкостью и индуктивностью спиральных обкладок. Распределение магнитного поля в данном случае близко к осесимметричному, а его напряженность в центре (H) может быть приближенно оценена по формуле:

$$H = \frac{NI}{\sqrt{a^2 + 4r^2}}, \quad (1)$$

где I – ток в обкладках спиральной линии; N – число витков спирали; a – ширина обкладок; r – средний радиус витков.

Экспериментальное определение H может быть выполнено при помощи индукционного преобразователя (ИП), размещенного внутри трубчатого каркаса, на который намотаны линии спирального ГИН. На рис. 2 представлены осциллограммы напряжения на высоковольтных выводах модели спирального ГИН цилиндрической компоновки. Регистрация выходного напряжения модели ГИН производилась парой идентичных высоковольтных импульсных емкостно-омических делителей напряжения с коэффициентами деления 1:1620. Для компенсации синфазной помехи, возникающей на заземленном выводе из-за влияния сопротивления растеканию тока и паразитной индуктивности зазем-

лителя (на рис. 1, *a* не показаны), была применена дифференциальная схема измерения [5]. На рис. 2 кривая 2 соответствует потенциалу синфазной помехи, а кривая 1 – потенциалу вывода $U_{\text{вых}}$, отсчитываемым от общей точки дифференциального измерительного тракта. Кривая М является результатом вычитания кривой 2 из кривой 1, то есть соответствует напряжению на выходе модели спирального ГИН. Максимальное напряжение на выходе модели, полученное при зарядном напряжении 1,5 кВ, составило 23 кВ. Количество витков спиральных обкладок $N = 18,5$, средний диаметр спиралей – 293 мм, ширина проводящих лент – 50 мм.

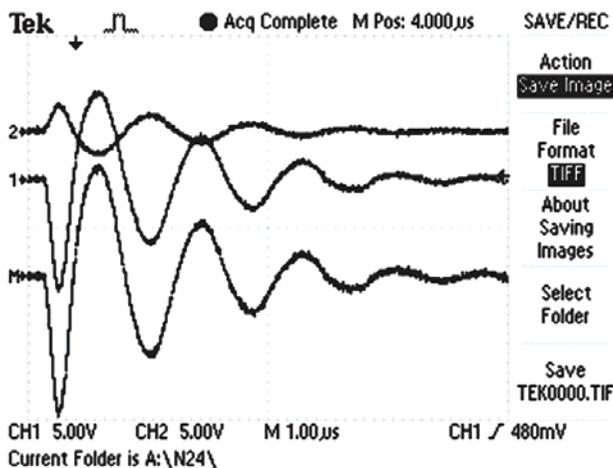


Рисунок 2 – Осциллограммы напряжений на выводах модели спирального ГИН цилиндрической компоновки, 8,1 кВ/дел: 1, 2 – потенциалы концов спиральных обкладок; М – разность потенциалов (то есть напряжение на выходе ГИН)

На рис. 3 представлена зависимость напряженности магнитного поля модели, зарегистрированного индукционным преобразователем, размещенным на ее оси симметрии. ИП представлял собой 8 витков провода, намотанного виток к витку на цилиндрический изоляционный каркас диаметром 22 мм. Регистрация выходного напряжения ИП производилась на его выводах в режиме холостого хода при помощи цифрового осциллографа Tektronix TDS1012, а напряженность магнитного поля H рассчитывалась путем численного интегрирования данного оцифрованного сигнала. Положение графика напряженности магнитного поля на оси абсцисс соответствует временным разверткам приведенных на рис. 2 осциллограмм (момент времени $t = 0$ на графике соответствует вертикальной стрелке в верхней части осциллограммы).

Кроме спирального ГИН цилиндрической компоновки известны и другие конструктивные исполнения данного устройства, реализующие трансформацию напряжения, основанную на том же принципе действия. Например, спиральный ГИН аксиальной компоновки [6], обкладки которого представляют

собой вложенные друг в друга пространственные трехмерные спирали, при работе создает магнитное поле, по конфигурации близкое к полю соленоидальной катушки. Данный тип спирального ГИН технологически сложно реализуем и характеризуется низким коэффициентом использования напряжения, поэтому на практике используется крайне редко.

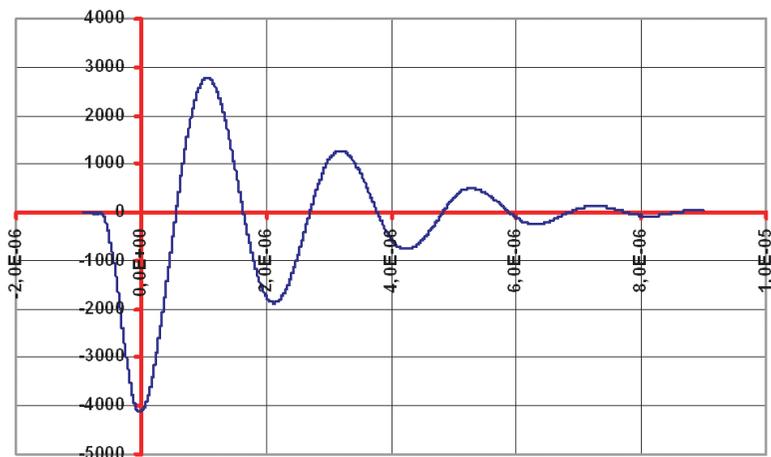


Рисунок 3 – Напряженность магнитного поля, зарегистрированного на его оси симметрии, А/м

Магнитное поле спирального ГИН плоской компоновки. Предложенный в работе [4] спиральный ГИН плоской компоновки (рис. 1, б) создает магнитное поле, имеющее сложную пространственную конфигурацию. Его эффективная работа возможна при использовании ферритового сердечника, работающего в ненасыщенном режиме. Для разработки такого ГИН необходима информация о напряженности импульсного магнитного поля, создаваемого плоской системой, образованной его обкладками, и о влиянии этого поля на магнитные свойства расположенного в них ферромагнитного сердечника.

Для контроля динамического перемагничивания ферромагнитного сердечника в средней его части был установлен индукционный преобразователь, состоящий из $W=10$ витков провода ПЭЛШО $0,1$ мм, намотанного на блок феррита НМ2000, представляющий собой прямоугольный параллелепипед $25 \times 25 \times 2,7$ мм, отпиленный от края одного из ферритовых стержней и вставленный после намотки на прежнее место. Площадь сечения рабочего окна индукционного преобразователя составляла $S = 25,1 \times 2,8 \approx 70,3$ мм². В модели плоского спирального генератора расстояние ИП от обкладок спиральных линий составляет единицы миллиметров. Как показали предварительные экспериментальные исследования, сильная емкостная связь, имеющая место между обкладками ГИН и измерительной обмоткой индукционного преобразователя, может оказывать существенное влияние на его выходной сигнал и тем самым

искажать результат измерений импульсного магнитного поля в сердечнике. Чтобы избежать этого влияния, индукционный преобразователь был размещен внутри сердечника вблизи оси симметрии устройства. Экспериментальная проверка, проведенная путем тестовых измерений при замкнутом индукционном преобразователе, показала, что при таком его размещении влияние помех, вызванных наличием импульсного электрического поля обкладок, несущественно.

На рис. 4 представлены осциллограммы напряжения на выходе модели плоского спирального ГИН и на выходе установленного в нем индукционного преобразователя.

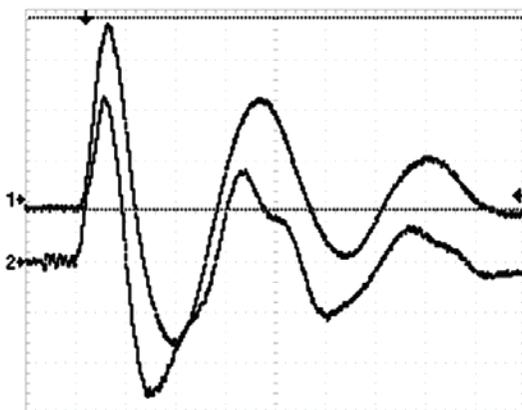


Рисунок 4 – Осциллограммы напряжений модели спирального ГИН плоской компоновки с ферритовым сердечником, 500 нс/дел: 1 – выходное напряжение, 8,1 кВ/дел; 2 – напряжение на индукционном преобразователе, 5 В/дел

Форма сигнала на выходе ИП свидетельствует о том, что уровень напряженности поля оказывается достаточным для частичного насыщения магнитной индукции в ферритовом сердечнике и, следовательно, снижения индуктивности витков спиральных обкладок. Тем не менее, магнитный сердечник при данном уровне напряженности магнитного поля остается еще достаточно эффективным. Так, выходное напряжение при использовании ферритового сердечника оказывается в 1,9 раза выше, чем в случае, когда феррит сердечника заменен на диэлектрическую вставку (осциллограммы этого режима работы модели приведены на рис. 5), и в 1,36 раза выше, чем амплитуда напряжения спирального ГИН цилиндрической компоновки (см. рис. 2). Количество витков спиральных обкладок, длина и ширина образующих их фольг, а также зарядное напряжение для моделей плоского и цилиндрического спиральных генераторов выбраны одинаковыми.

Из осциллограммы напряжения на индукционном преобразователе (рис. 4 кривая 2) видно, что форма пронизывающего его магнитного потока существенно не синусоидальна. Нелинейность магнитной проницаемости ферритово-

го сердечника влияет на изменение индукции магнитного поля B и должна учитываться при анализе электромагнитных процессов в спиральном ГИН. Параметры зависимости $B(H)$ феррита при воздействии на него импульсного магнитного поля ГИН неизвестны, поэтому определение формы импульсной напряженности поля в сердечнике $H(t)$ путем интегрирования сигнала индукционного преобразователя невозможно. График зависимости индукции магнитного поля от времени $B(t)$ в ферритовом сердечнике модели спирального ГИН плоской компоновки, рассчитанный по данным осциллограммы рис. 4, представлен на рис. 6.

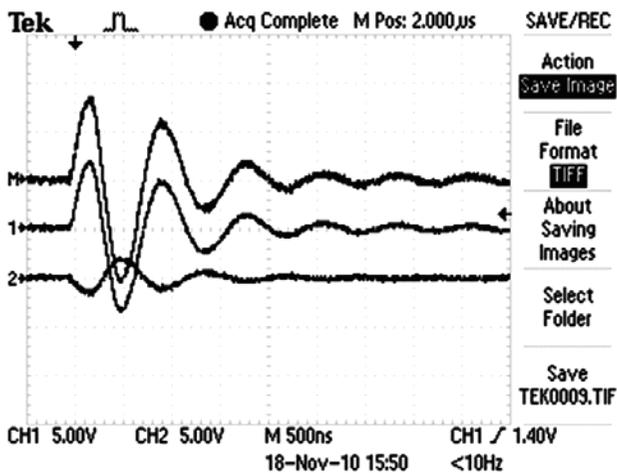


Рисунок 5 – Осциллограммы напряжений модели спирального ГИН плоской компоновки без ферритового сердечника, 8,1 кВ/дел: 1, 2 – потенциалы концов спиральной обкладки; M – разность потенциалов концов обкладки (то есть напряжение на выходе ГИН)

Максимальное значение индукции магнитного поля в сердечнике при работе модели составило 0,57 Тл, что значительно превосходит индукцию насыщения феррита M2000HM в статическом режиме, составляющую $B_{нас} = 0,39$ Тл при напряженности поля $H = 800$ А/м. Критическая частота данного феррита по справочным данным составляет $f_{кр} = 0,1 - 0,35$ МГц, в то время как частота, соответствующая крутизне нарастания поля в спиральном ГИН, рассчитанная по данным рис. 6: $f_{эфф} = 0,55$ МГц. По-видимому, из-за высокой скорости нарастания напряженности поля эффективная магнитная проницаемость феррита значительно меньше, чем его начальная статическая проницаемость. Вследствие магнитной вязкости домены не успевают полностью ориентироваться по полю, и полное насыщение зависимости $B(H)$ не наступает даже в полях, значительно превосходящих рекомендованные для данной марки феррита. Этим и объясняется эффективная работа ферритового сердечника спирального ГИН в режимах, далеких от паспортных. Неопределенность

свойств материала магнитоэлектрического сердечника в режимах, отличных от номинального создает значительную сложность при расчете конструкции и режима работы спирального ГИН. Это делает необходимым проведение аналогичных экспериментов с сердечниками, выполненными из других магнитоэлектриков.

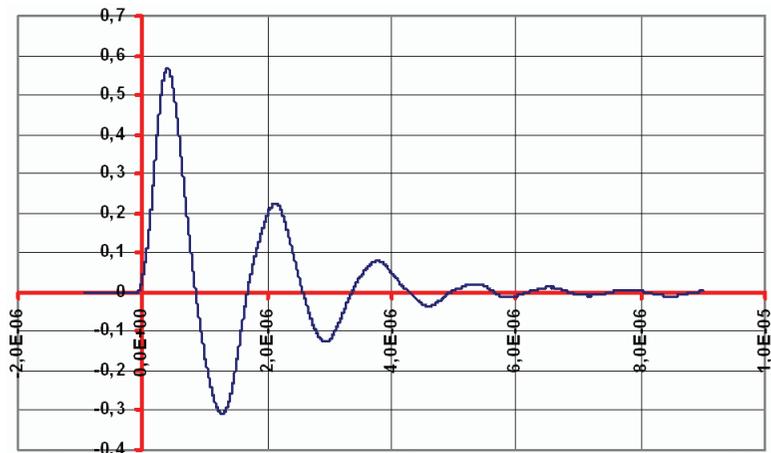


Рисунок 6 – Индукция магнитного поля в сердечнике модели спирального ГИН плоской компоновки, Тл

Выводы:

1. Экспериментальное исследование магнитного поля спирального генератора импульсов высокого напряжения с сердечником из феррита показало, что нелинейность его магнитной проницаемости не оказывает существенного влияния на форму выходного напряжения. Ферритовый сердечник в спиральном генераторе может эффективно использоваться даже в тех случаях, когда амплитудные и частотные параметры магнитного поля обкладок в несколько раз превышают рекомендованные для данного феррита режимы.

2. Технологические, электрические и эксплуатационные преимущества спирального ГИН плоской компоновки [4] делают актуальными исследования, связанные с отработкой оптимальных режимов его работы. При отсутствии магнитоэлектрического сердечника низкая индуктивность витков спиральных обкладок плоского ГИН приводит к снижению его коэффициента использования напряжения по сравнению с ГИН классической цилиндрической конструкции в 1,5 раза. Использование в конструкции спирального ГИН ферритового сердечника позволяет существенно увеличить коэффициент использования напряжения. Эксперименты с физическими моделями показали, что сердечник из феррита позволяет достичь напряжения на выходе ГИН плоской компоновки, превышающего в 1,36 раза выходное напряжение классического цилиндрического ГИН при одинаковых длине, ширине и конструкции изоляции спиральных линий.

Список литературы: 1. *Fitch R.A., Howell V.T.S.* Novel Principle of Transient High-Voltage Generation // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, Science and General. The Institution of Electrical Engineers, UK. – Apr. 1964. – Vol. 111, № 4. – PP. 849-855. 2. *Fitch R.A., et al.*, Patent USA 3289015. Oct. 1, 1964. 3. *Кремнев В.В., Месяц Г.А.* Методы умножения и трансформации импульсов в силовой электронике. – Новосибирск: Наука, 1987. 4. *Резинкин О.Л.*, Физическое моделирование электромагнитных процессов в плоском спиральном генераторе импульсов высокого напряжения с ферромагнитным сердечником // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2011. – № 4. – С. 94-102. 5. *Шваб А.Й.* Электромагнитная совместимость. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 480 с. 6. *Козлов М.И.* Высоковольтный импульсный генератор // ПТЭ. – 1973. – № 5. – С. 106-108.

Поступила в редколлегию 24.03.2011.