

01;12

Об уточнении теоретической модели для спирального генератора высоких напряжений

© **Е.И. Биченков**, Е.И. Пальчиков, А.М. Рябчун, Т.Ю. Башкатов

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева,
630090 Новосибирск, Россия
e-mail: palchikov@hydro.nsc.ru

(Поступило в Редакцию 21 февраля 2007 г.)

Проанализирован принцип работы генераторов высоковольтных импульсов, предложенных Фитчем, Хауэллом и независимо — Белкиным, Жарковой в 1961 г. Показано, что спиральный генератор Фитча–Хауэлла является частным случаем трансформатора Белкина–Жарковой. Предложены модели, позволяющие более точно описать поведение спирального генератора в неидеальных случаях его геометрии и режимов работы. Проведена радикальная модификация модели, предложенной Рюлем и Герцигером, повышающая точность расчета в несколько раз. На основе сравнения рассчитанных и экспериментально измеренных результатов показывается, что при малом числе витков и высокой индуктивности ключа для описания спирального генератора лучше подходит модель трансформатора Тесла, а для большого числа витков и малой индуктивности ключа — модифицированная модель Рюля–Герцигера.

PACS: 84.30.Ng, 84.70.+p

Введение

Среди источников импульсов высокого напряжения наименее исследованным является спиральный генератор, предложенный Фитчем и Хауэллом в 1961 г. [1]. По отношению энергии к объему и по простоте устройства спиральный генератор, казалось бы, должен часто использоваться в электрофизических устройствах. Проблемы возникают при попытке подогнать характеристики спирального генератора к габаритным и энергетическим характеристикам конкретных устройств, пригодных для практического использования.

Подробно схема и принцип действия спирального генератора изложены в [2]. Работа генератора основана на замыкании ключом S заряженной плоской двухшинной линии, свернутой в рулон (рис. 1, a). При этом по активной линии (закрашена на рис. 1, a се-

рым цветом) идет волна. После отражения волны от разомкнутого конца на активной линии происходит инверсия напряжения. Напряжения в слоях активной и пассивной линий складываются с одним знаком, давая в сумме напряжение, кратное удвоенному количеству витков генератора. Для реального случая предложенный Фитчем и Хауэллом принцип инверсии выполняется частично. Так как спиральный генератор содержит в себе индуктивность спиральной линии, подсоединенную параллельно выходу генератора, то при срабатывании генератора во время нарастания напряжения на нагрузке часть выходного тока утекает через эту индуктивность, снижая КПД и рабочее напряжение генератора. Для высокого КПД необходимо малое отношение высоты (толщины) намотки к диаметру генератора. С другой стороны, зафиксировав диаметр, нельзя беспреступно уменьшать толщину намотки — обмотка должна выдер-

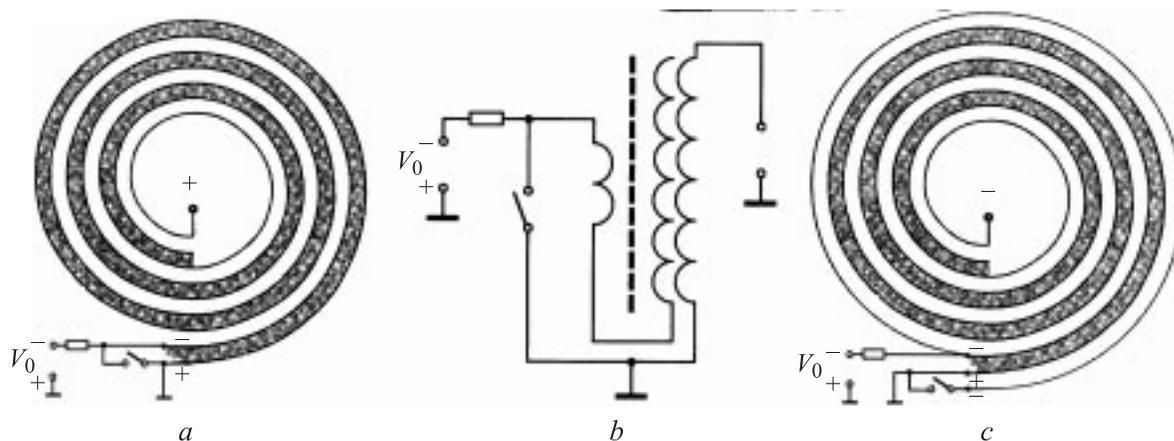


Рис. 1. Схемы генераторов: a — Фитча–Хауэлла. Обычный спиральный генератор; b — трансформатор Белкина–Жарковой; c — схема Фитча–Хауэлла + 1 виток к внутренней шине.

живать выходное импульсное напряжение генератора и статическое напряжение зарядки длинных полосковых линий, составляющих генератор. КПД генератора может быть увеличен, а диаметр уменьшен, если поместить внутри и снаружи его магнитный сердечник. Проблемой также является сильная зависимость КПД генератора от характеристик разрядника, замыкающего линию — его времени включения, индуктивности и внутреннего сопротивления. Для того чтобы устройство работало как длинная линия, а не как колебательный контур, состоящий из емкости спиральной линии и индуктивности разрядника, необходимо, чтобы импеданс и время срабатывания разрядника были соответственно меньше импеданса и времени прохождения сигнала по полосковой линии. Это вступает в противоречие с требованием малой толщины намотки для увеличения КПД — при малой толщине волновое сопротивление двухшинной линии уменьшается и, в свою очередь, требует рекордных характеристик разрядника, как правило, не достижимых на практике.

Множество параметров подбора исключает достижение оптимума по КПД, размерам и напряжению эмпирическим путем. Существующие теоретические модели имеют низкую точность, не позволяющую оптимизировать конструкцию генератора. Таким образом, для использования спирального генератора в реальных электрофизических приборах необходима более точная теоретическая модель.

Уточнение теоретической модели спирального генератора

В единственной известной нам попытке более подробного теоретического расчета генератора, проведенного Ф. Рюлем и Дж. Герцигером [3], большинство уравнений, описывающих работу спирального генератора, были записаны неверно, и неясно, каким образом в итоге были получены правильные, хотя и приближенные (магнитный поток через любой виток одинаков и число витков $\gg 1$) конечные уравнения.

Исходные уравнения, описанные в [3], можно получить из более простых соображений. Пусть I_s — ток активной линии

$$\Delta Q = \int_0^t I_s dt, \quad (1)$$

где ΔQ — изменение заряда на активной линии. С усреднением с точностью до 1-го витка (предполагая, что заряд внедрился более чем на виток) можно записать

$$\Delta U_z = \frac{\Delta Q N}{C' l N}. \quad (2)$$

Здесь C' — емкость на единицу длины линии, l — длина одного витка, N — число витков генератора. Значение N

сокращается, что подтверждает интегральный характер ΔU_z и его независимость от конкретного распределения заряда вдоль линии. Это связано с конструктивными особенностями генератора. Дифференцирование (2) по времени дает

$$\frac{dU_z}{dt} = \frac{I_s}{C' l}. \quad (3)$$

Учитывая, что

$$C = \frac{C' l}{2N}, \quad C' l = 2CN,$$

где C — выходная емкость генератора, получим

$$\frac{dU_z}{dt} = \frac{I_s}{2NC}. \quad (4)$$

Выражение (4) не учитывает стекание заряда через спираль. Учет этого стекания удобнее производить с помощью преобразования Лапласа.

Перейдем в область изображений. Выражение (4) преобразуется в

$$s C u_z = \frac{i_s}{2N}, \quad (5)$$

здесь s — знак оператора преобразования Лапласа. Добавив к (5) члены, описывающие стекание заряда через индуктивность спирали L и через нагрузку на выходе генератора Z

$$s C u_z = \frac{i_s}{2N} - \frac{u_z}{Ls} - \frac{u_z}{Z}, \quad (6)$$

получим выходное напряжение генератора, совпадающее с приведенным в [3]:

$$u_z = \frac{i_s s}{2NC(s^2 + \frac{1}{LC} + \frac{s}{CZ})}. \quad (7)$$

Выражение для i_s получаем, используя линейность исходных уравнений. Пусть $A(t)$ — ток, индуцированный единичной ступенькой напряжения на активной линии, тогда

$$I_s(t) = u_0 A(t) + \int_0^t A(t-t') \frac{I_z(t') dt'}{2NC}. \quad (8)$$

Здесь I_z — ток стекания заряда через индуктивность L и нагрузку Z . Преобразованием Лапласа получаем из (8)

$$i_z = u_z \left(\frac{1}{Ls} + \frac{1}{Z} \right)$$

и

$$i_s = u_0 \left(A(s) + A(s) \frac{u_z}{2NC u_0} \left(\frac{1}{Ls} + \frac{1}{Z} \right) \right) \quad (9)$$

или

$$i_s = u_0 A(s) \left(1 + \frac{u_z}{2N u_0} \left(\frac{1}{CLs} + \frac{1}{ZC} \right) \right). \quad (10)$$

После нормировки получаем из (7) и (10):

$$\beta(p) = \frac{p i_s}{p^2 + \tau p + \omega^2}$$

и

$$i_s = A(p) \left(1 + \beta(p) \left(\frac{\omega^2}{p} + \tau \right) \right). \quad (11)$$

Здесь $\beta(p)$ — выражение для выходного напряжения генератора в безразмерном виде. Исключив i_s из уравнения (11), получим

$$\beta(p) = \frac{p A(p)}{p^2 + (1 - A(p))(\tau p + \omega^2)}. \quad (12)$$

Для понимания принципов работы генератора экспериментальные измерения производились в упрощенном виде — без нагрузки ($Z = 0$, $\tau = 0$). Дальнейшее обсуждение будет проводиться в данном приближении.

Для ключа с нулевым сопротивлением (идеального ключа) уравнение (12) сводится к следующему дифференциальному уравнению:

$$\beta'''(t) + \omega^2(\beta'(t) - \tilde{\beta}(t)) = 0. \quad (13)$$

Знаком „ \sim “ помечается величина, обладающая следующими свойствами:

$$\tilde{\beta}(t) \equiv \beta(t) \quad 0 \leq t < 1,$$

$$\tilde{\beta}(t) \equiv \beta(t) - 2\beta(t-1) \quad 1 \leq t < 2,$$

$$\tilde{\beta}(t) \equiv \beta(t) - 2\beta(t-1) + 2\beta(t-2) \quad 2 \leq t < 3,$$

$$\tilde{\beta}(t) \equiv \beta(t) - 2\beta(t-1) + 2\beta(t-2) \dots + 2(-1)^M \beta(t-M)$$

$$M \leq t < M+1. \quad (14)$$

Таким образом, (13) на самом деле представляет собой цепочку дифференциальных уравнений с отклоняющимся аргументом. Каждое звено цепочки соответствует проходу волны вдоль линии туда—обратно.

Для чисто индуктивного ключа уравнение (12) приводится к

$$\beta''''(t) = -\frac{1}{\tau_s} \beta''''(t) - \omega^2 \left(\tilde{\beta}''(t) + \frac{1}{\tau_s} (\beta'(t) - \tilde{\beta}(t)) \right). \quad (15)$$

Здесь $\tau_s = \frac{L_s}{Z_0 T}$ — время нарастания тока через ключ, L_s — индуктивность ключа, T — время прохода волны вдоль линии туда—обратно, Z_0 — волновой импеданс активной линии

$$\tau_p = \frac{4}{\omega^2} + \tau_s.$$

При выходе этих уравнений предполагалось, что первоначальный заряд пассивной линии сохраняется. Видно, что пассивная линия при замыкании ключа также замыкается, но через ключ и один (внешний) виток

генератора. Если не учитывать взаимные влияния через импеданс ключа (индуктивность одного витка обычно много больше индуктивности ключа), то возникает симметричная картина. Активная и пассивная линия разряжаются одновременно с разными скоростями. Собственное время пассивной линии в нормированном виде задается как

$$\tau_p = \frac{4}{\omega^2} + \tau_s.$$

Взаимным влиянием можно пренебречь при $\frac{4}{\omega^2} \gg \tau_s$.

При этом уравнение (11) принимает вид

$$\beta(p) = \frac{p(i_s - i_p)}{p^2 + \tau p + \omega^2}, \quad i_s = A(p) \left(1 + \beta(p) \left(\frac{\omega^2}{p} + \tau \right) \right),$$

$$i_p = A(p) \left(1 - \beta(p) \left(\frac{\omega^2}{p} + \tau \right) \right). \quad (16)$$

Здесь i_p — нормированный волноводный ток пассивной линии. А уравнение (13) переходит в

$$\begin{cases} \beta''(t) + \tau \beta'(t) + \omega^2 \beta(t) = i_s'(t) - i_p'(t), \\ \tilde{i}_s(t)''' + \frac{1}{\tau_s} i_s(t)'' = \frac{\omega^2}{\tau_s} \tilde{\beta}(t), \\ \tilde{i}_p(t)''' + \frac{1}{\tau_p} i_p(t)'' = -\frac{\omega^2}{\tau_p} \tilde{\beta}(t), \end{cases} \quad (17)$$

которое является более точным приближением, по сравнению с уравнением (13), полученным в [3]. Качественно решения похожи, но различия в амплитуде выходных напряжений доходят до 40%. Как будет показано ниже, предлагаемое модифицированное решение (17), учитывающее волны в пассивной линии, дает результаты, лучше совпадающие с экспериментальными данными.

Генератор Белника—Жарковой

Стоит отметить, что одновременно с заявкой Фитча и Хауэлла на спиральный генератор [1] (и за три года до публикации Фитча и Хауэлла [2]) Н.В. Белкиным и А.Я. Жарковой (ВНИИЭФ, г. Саров) в 1961 г. была подана заявка за № 744249/26-9 и получено авторское свидетельство № 149494 СССР на импульсный трансформатор [4], частным случаем которого является генератор Фитча—Хауэлла. В этом трансформаторе первичная накопительная емкость выполнена в виде спиральной двухшинной линии и одновременно выполняет роль вторичной обмотки.

Схема, предложенная Белкиным и Жарковой, показана на рис. 1, *b*. Схема спирального генератора Фитча—Хауэлла представлена на рис. 1, *a*.

Из приведенных на рис. 1, *a, b* схем видно, что если к схеме спирального генератора Фитча—Хауэлла добавить один виток к внутренней шине, то в результате получается тот же спиральный генератор, только меняется знак

напряжения на выходе генератора, а активная линия меняется местом с пассивной. Аналогичный результат получается убавлением одного витка от внешней шины. Это подтверждается и экспериментальной проверкой — осциллограмма выходного напряжения выглядит в деталях точно так же (с незначительной поправкой по амплитуде и времени на один дополнительный виток), но перевернута вверх ногами. Таким образом, любая схема спирального генератора может быть представлена в виде спиральной двухшинной линии, разряженной на одиночный виток. Эти схемы являются разновидностью трансформатора Тесла, предложенного Н.В. Белкиным и А.Я. Жарковой [4], с частным случаем, когда число витков в первичной обмотке равно одному.

Данный результат, когда простой геометрической перерисовкой со сменой обозначений получается как спиральный генератор, так и трансформатор Тесла с рулонной емкостью, разряжаемой на один виток, ставит под сомнение корректность изящной модели Фитча–Хауэлла [2] и, тем более — Рюля–Герцигера [3] (по крайней мере, для неидеальных спиральных трансформаторов, у которых толщина намотки сравнима с диаметром или индуктивность ключа не нулевая). И оправдывает как вполне допустимый анализ устройства в приближении трансформатора Тесла. Естественно, волны внутри двухшинной линии при данном анализе не учитываются. Но, как показывает обобщенный анализ, приведенный выше, интегрально законы сохранения заряда и индукции соблюдаются, а внешние напряжения и токи на нагрузку с генератора такие же плавные, как от простого трансформатора Тесла.

Это хорошо заметно по анализу экспериментальной осциллограммы для изготовленного нами генератора с (внутренним) диаметром 185 mm и 58 витками, приведенной на рис. 2. Ширина намотки генератора 115 mm,

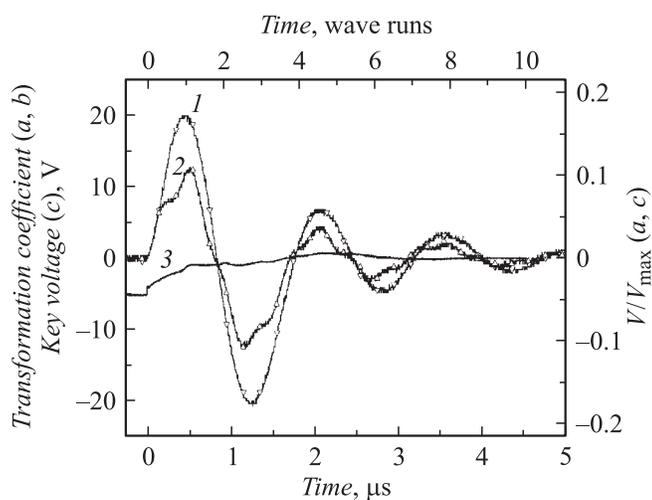


Рис. 2. Осциллограммы напряжений при работе спирального генератора с большим числом витков ($N = 58$): 1 — напряжение на выходе, 2 — напряжение в середине обмотки; 3 — напряжение на ключе.

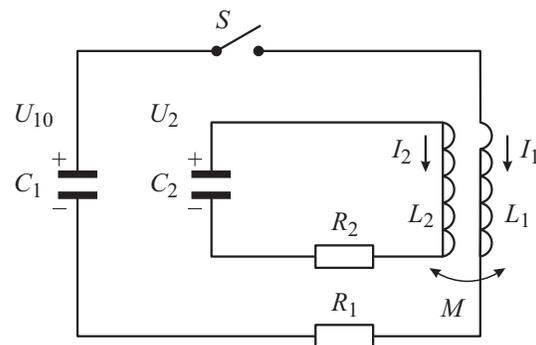


Рис. 3. Схема трансформатора Тесла.

толщина изоляции 100 μm по лавсану, толщина фольги 30 μm , индуктивность ключа 29 nH.

Видно, что напряжение на ключе (рис. 2, 3) содержит как мелкие короткие скачки, связанные с отражениями в двухшинной линии, так и плавные осцилляции, характерные для трансформатора Тесла. Видно также, что на выходе генератора напряжение имеет вид плавной затухающей синусоиды (рис. 2, 1), никаких резких изломов и скачков от отражений сигналов в двухшинной линии не заметно. Напряжение, выведенное с середины спирали с 29 витков (рис. 2, 2) содержит ступеньки, характерные для сложения встречных волн в длинной линии.

В модели Фитча–Хауэлла процесс стекания заряда и индуктивная связь витков являются побочными паразитными эффектами на фоне процесса инверсии в длинной линии. В модели трансформатора Тесла, наоборот, волны, бегущие вдоль вторичной обмотки, являются побочным паразитным эффектом, а индуктивная связь и токи через обмотки — основными рассматриваемыми эффектами.

Волны во вторичной обмотке — рядовое явление в трансформаторе Тесла. Данное явление может быть убрано частично [5] либо полностью [6] за счет специального размещения витков вторичной обмотки в пространстве между высоковольтным и низковольтным электродами.

Описание модели трансформатора Тесла

Схема трансформатора Тесла показана на рис. 3 (C_1 , C_2 , L_1 , L_2 , R_1 , R_2 — емкости, индуктивности и сопротивления первичного и вторичного контуров соответственно; M — коэффициент взаимной индукции). Система уравнений для процессов в данной схеме, начинающихся после замыкания ключа, записывается в виде

$$\begin{cases} L_1 C_1 \frac{d^2 U_1}{dt^2} + M C_2 \frac{d^2 U_2}{dt^2} + R_1 C_1 \frac{dU_1}{dt} = -U_1, \\ M C_1 \frac{d^2 U_1}{dt^2} + L_2 C_2 \frac{d^2 U_2}{dt^2} + R_2 C_2 \frac{dU_2}{dt} = -U_2. \end{cases} \quad (18)$$

С начальными условиями

$$\begin{aligned} U_1|_{t=0} &= U_{10}, \\ U_2|_{t=0} &= 0, \\ \frac{dU_1}{dt}|_{t=0} &= 0, \\ \frac{dU_2}{dt}|_{t=0} &= 0, \\ \left\{ \begin{array}{l} U_1|_{t=0} = U_{10}; \\ U_2|_{t=0} = 0; \end{array} \right. & \frac{dU_1}{dt}|_{t=0} = 0, \\ & \frac{dU_2}{dt}|_{t=0} = 0. \end{aligned}$$

Решение для данной системы уравнений находилось численно методом Рунге–Кутты 4–5 порядка.

Применимость разных теоретических моделей для спирального генератора с малым и большим числом витков

Для проверки применимости предполагаемых теоретических моделей генератора в модели были подставлены параметры реальных генераторов.

Осциллограмма напряжений на выходе и на ключе для генераторов с малым числом витков приведена на рис. 4. Параметры генераторов следующие: внутренний диаметр 185 mm, 10 витков, ширина намотки 115 mm, толщина изоляции 100 μm по лавсану, толщина мелкой фольги 30 и 90 μm , индуктивность ключа 29 nH. Толщина скин-слоя для характерного периода колебаний в системе $\sim 50 \mu\text{m}$. Никаких скачков в осциллограмме напряжения на ключе (рис. 4, 3), связанных с отражениями в линии здесь, в отличие от рис. 2, 3, не наблюдается.

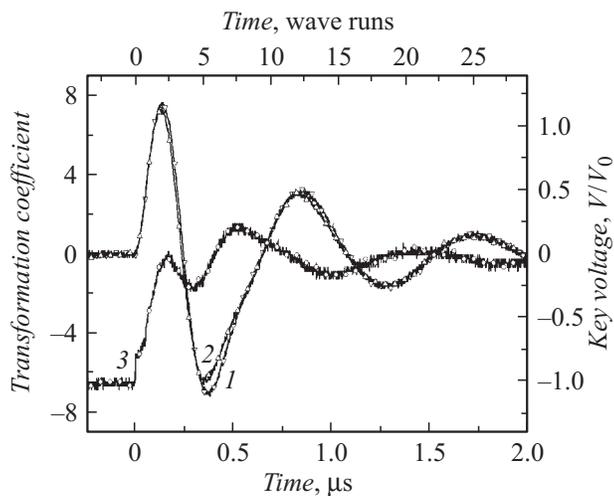


Рис. 4. Осциллограммы напряжений при работе спирального генератора с малым числом витков ($N = 10$): 1 и 2 — напряжение на выходе, толщина фольги 90 и 30 μm соответственно, 3 — напряжение на ключе.

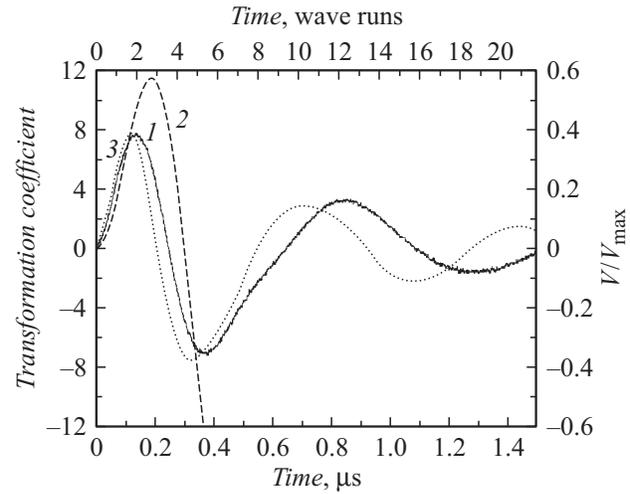


Рис. 5. Генератор с малым числом витков ($N = 10$): 1 — экспериментально полученный график, 2 — график согласно модифицированной модели Рюля–Герцигера, 3 — график согласно модели трансформатора Тесла.

Из осциллограмм выходного напряжения (рис. 2, 1 и 2) для генераторов с витками из фольги толщиной более и менее скин-слоя (90 и 30 μm соответственно) видно, что влияние толщины фольги сказывается на выходном напряжении незначительно.

На рис. 5 приведены результаты сравнения подстановки параметров генератора с 10 витками в модифицированную модель спирального генератора с параметрами $W_0 = 0.5$, $\tau_s = 2.2$ и в модель трансформатора Тесла.

На рис. 5, 1 приведен экспериментально полученный график, на рис. 5, 2 — график, построенный согласно модифицированной модели Рюля–Герцигера, рассчитанный для 6 пробегов волны вдоль линии, на рис. 5, 3 — график, построенный согласно модели трансформатора Тесла. Видно, что решения цепочки из 6 дифференциальных уравнений с уклоняющимся аргументом (17) гладко сшиваются и никаких особенностей, связанных с отражением в длинной линии, не содержат.

Из сравнения рис. 5, 1 и 2 видно, что модифицированная модель не сходится с экспериментом по времени в 1.4 раза, а по амплитуде — в 1.5 раза. Модель Рюля–Герцигера дает для генератора данной конфигурации расхождение по времени в 1.7 раза, а по амплитуде — в 2 раза (что дает ошибку в 4 раза при предсказании КПД). Конечно, модифицированная модель дает лучшие результаты, но они все равно далеки от экспериментальных результатов и вряд ли могут использоваться на практике. В данном случае, при малом числе витков, генератор может вести себя как сосредоточенная емкость, а не как длинная линия, так как время распространения волны вдоль линии туда и обратно в данном случае меньше, чем время разрядки индуктивности ключа на волновое сопротивление линии ($\tau_s = \frac{L_s}{Z_0 T} \gg 1$), и меньше, чем характерное время собственных колебаний в системе индуктивность ключа–

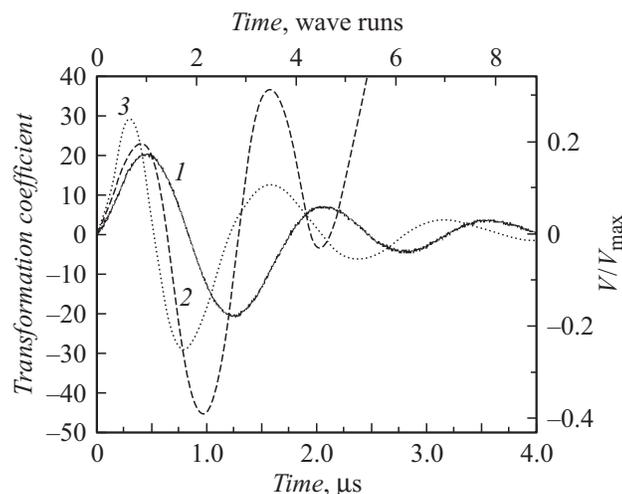


Рис. 6. Генератор с большим числом витков ($N = 58$); 1 — экспериментально полученный график, 2 — график, построенный согласно модифицированной модели Рюля–Герцигера, 3 — график, построенный согласно модели трансформатора Тесла.

емкость двухшинной линии. Поэтому теоретическая модель трансформатора Тесла более подходит для данного генератора.

Более интересны результаты подстановки параметров изготовленного маловиткового генератора в модель трансформатора Тесла (ср. рис. 5, 1 с 2). Для экспериментально измеренных емкостей и индуктивностей генератора подбирались коэффициент связи и добротности, дающие отношение амплитуды второй полуволны к амплитуде первой, наиболее близкое к измеренному. Значение амплитуды первой полуволны изменялось незначительно от изменений коэффициента связи и добротностей. Полученные таким образом параметры в модели: коэффициент связи контуров $k = 0.7$, добротности первичных и вторичных контуров — 3 и 4 соответственно.

Видно, что модель трансформатора Тесла описывает поведение спирального генератора достаточно хорошо, по крайней мере, лучше, чем модифицированная модель Рюля–Герцигера. Совпадение первого максимума и минимума по амплитуде происходит с точностью до 5%. Времена выхода на максимум и минимум совпадают с экспериментом с точностью не хуже 20%. Форма кривой в модели похожа на осциллограмму, вплоть до изгиба во второй полуволне, но затухание в реальном генераторе происходит быстрее. Возможно, что связано с эффектом, называемым „Eddy Currents“, — ситуацией, когда имеются близко расположенные поверхности с параллельными токами и их отражениями внутри скин-слоев.

На рис. 6, 1 приведена осциллограмма выходного напряжения для генератора из 58 витков, кривая 2 — график выходного напряжения, полученный в результате подстановки параметров генератора с $W_0 = 2.26$,

$\tau_s = 0.36$ в модифицированную модель спирального генератора Рюля–Герцигера.

Расчетное время пробега волны по двухшинной линии туда–обратно для этого генератора равно 450 ns. Сравнив кривые 1 и 2 (рис. 6), видим, что время выхода первой полуволны на максимум в эксперименте равно 472 ns, а по модифицированной модели 405 ns. Видно, что совпадение по амплитуде преющей полуволны — 15%. По времени выхода первой полуволны на максимум значение модели занижено на 14%. Коэффициент трансформации в модифицированной модели Рюля–Герцигера для первой полуволны равен 23, а полученный из осциллограммы — 20 (что соответствует КПД 3.8 и 3%, или амплитуде 0.1955 и 0.17 от максимальной соответственно). В исходной (неисправленной) модели Рюля–Герцигера [3] амплитуда первой полуволны превышает в два раза экспериментальную, что дает ошибку определения КПД в четыре раза, время выхода на максимум первой полуволны 555 ns, что превышает на 17.6% экспериментально полученное. Видно, что по всем параметрам предложенная модифицированная модель лучше. Вторую полуволну лучше не анализировать. В модели не учитываются омические потери, поэтому решение в данной области не несет полезной информации. Для реальных устройств обычно используется первая полуволна.

Полученный в модели низкий КПД многovitкового спирального генератора, совпадающий с реально измеренными значениями, связан с существенной энергией, остающейся в колебаниях как внутри активной двухшинной линии, так и вдоль витков генератора (в пассивной линии). Заметная часть энергии во время максимума первой полуволны находится в магнитном поле генератора.

Анализ применения модифицированной модели Рюля–Герцигера к многovitковому генератору дает неплохие результаты и убирает многократное различие между теорией и экспериментом, отмеченное ранее в работе [7]. Полученные в [7] экспериментальные значения максимума выходного напряжения, равные 0.3 для 15 витков и 0.25 для 25 витков от идеального теоретического, соответствуют КПД 9 и 6.8% соответственно. Видно, что КПД падает с ростом числа витков.

На рис. 6, 3 приведен график выходного напряжения, полученный в результате подстановки параметров многovitкового генератора в модель трансформатора Тесла. Параметры в модели следующие: коэффициент связи контуров $k = 0.57$, добротности первичного и вторичного контуров — $Q_1 = Q_2 = 2$.

Форма кривой в модели полностью совпадает с формой, полученной на осциллограмме. Время выхода на максимум в первой полуволне отличается примерно в полтора раза (300 ns в модели вместо 472 в эксперименте). Все амплитуды также отличаются (пропорционально коэффициенту 1.5). Модель дает большие значения напряжений, чем в эксперименте. Причина несоответствия

напряжений может быть связана с тем, что в модели трансформатора Тесла нет потерь на внутренние волны в двухшинной линии. Несоответствие во времени связано с тем, что в ней в качестве индуктивности первичного контура бралась индуктивность коммутатора. Как уже отмечалось ранее, к ней нужно прибавить какую-то часть от индуктивности первого витка.

Не стоит забывать различия между спиральным генератором и обычным трансформатором Тесла, где вторичная обмотка состоит из одного проводника. Двухшинная линия при разрядке производит квадрупольное магнитное поле в ближайшей окрестности рулона. Ток разрядки генератора вдоль спирали порождает дипольное магнитное поле, поэтому трансформатор Тесла с данной геометрией имеет низкий коэффициент связи. Увеличение диаметра обмотки (как это делается в [2]) или установка магнитопроводов внутри и снаружи позволяют улучшить характеристики спирального генератора. Однако применение магнитопроводов в спиральном генераторе выходит за рамки нашей работы и должно стать темой для отдельного исследования.

Выводы

Предложены модели, позволяющие более точно описать поведение спирального генератора в неидеальных случаях его геометрии и режимов работы. Проводится радикальная модификация модели, предложенной Рюлем и Герцигером, повышающая точность расчета в несколько раз. В исходной модели предполагалось, что первоначальный заряд пассивной линии сохраняется, а волна перезарядки бежит только по активной линии. В предложенной нами модифицированной модели учитывается, что волны разной формы и с разными задержками бегут как по активной, так и по пассивной линии.

Проведенный анализ показал, что спиральный генератор Фитча–Хауэлла является частным случаем трансформатора, предложенного Н.В. Белкиным и А.Я. Жарковой (ВНИИЭФ, г. Саров) в 1961 г. А он, в свою очередь, является разновидностью трансформатора Тесла, поэтому для описания подходит как модифицированная модель Рюля–Герцигера, так и модель трансформатора Тесла.

На основе сравнения посчитанных и экспериментально измеренных результатов показывается, что при малом числе витков и высокой индуктивности ключа для описания спирального генератора лучше подходит модель трансформатора Тесла, а для большого числа витков и малой индуктивности ключа — модифицированная модель Рюля–Герцигера. При этом в моделях Фитча–Хауэлла и Рюля–Герцигера процесс стекания заряда и индуктивная связь витков являются побочными паразитными эффектами на фоне процесса инверсии в длинной линии. В модели трансформатора Тесла, наоборот, волны, бегущие вдоль вторичной обмотки, являются

побочным паразитным эффектом, а индуктивная связь и токи через обмотки — основными рассматриваемыми эффектами.

Проведенные экспериментальные и теоретические исследования показывают, что для практически реализуемых конструкций КПД спирального генератора с увеличением числа витков падает. Конструкция с числом витков более 30–40 имеют неконкурентоспособный с трансформаторами Тесла и генераторами Аркадьева–Маркса КПД. Однако выходная индуктивность генератора при его быстром разряде на нагрузку через разрядник-обостритель является рекордно низкой.

Экспериментально выяснено, что для генератора с малым числом витков для увеличения КПД нет смысла брать фольгу, превышающую толщину одного скин-слоя.

Список литературы

- [1] *Fitch R.A., Howell V.T.S.* // Patent. Appl. 1961. P. 18 136.
- [2] *Fitch R.A., Howell V.T.S.* // Proc. IEEE. 1964. Vol. 111. P. 849.
- [3] *Рюль Ф., Герцигер Дж.* // Приборы для научных исследований. 1980. Т. 11. С. 103–110.
- [4] *Белкин Н.В., Жаркова А.Я.* А.с. 149494 СССР. Класс 21d², 49. Импульсный трансформатор. Заявлено 06.09.1961 г. за № 744249/26-9. БИ. № 16. 1962.
- [5] *Абрамян Е.А., Вассерман С.Б., Долгушин В.М., Казарезов И.В., Куценко В.Ф., Радченко В.М.* Перенапряжения в высоковольтном импульсном ускорителе. Препринт ИЯФ СО АН СССР № 48-71. Новосибирск, 1971.
- [6] *Биченков Е.И., Пальчиков Е.И.* // Физика горения и взрыва. 1997. Т. 33. № 3. С. 159–167.
- [7] *Brau C., Raybun J., Dodge J., Gilman F.* // Rev. Sci. Instr. 1977. Vol. 48. N 9. P. 1154–1160.