

Физическая аппаратура

УДК 621.373

Малогабаритный модульный генератор импульсного напряжения

Ю.Ф. Бондарь, Г.П. Мхеидзе

Для увеличения удельной энергоемкости кабельного генератора Маркса предлагается в качестве диэлектрика использовать конденсаторную керамику с диэлектрической постоянной $\epsilon \approx 900$, что позволит создать малогабаритный модульный генератор с параметрами $U \approx 200$ кВ, $I \approx 8$ кА, $\tau \approx 20$ нс и удельной энергоемкостью порядка 3,3 Дж/дм³.

PACS: 07.50.-e

Ключевые слова: генератор, импульсное напряжение, керамика, высокое напряжение..

Введение

Во многих научных центрах ведутся работы по созданию эффективных генераторов импульсного напряжения (ГИН). Интерес к ним вызван возможностью их широкого использования в различных областях науки и техники. ГИН могут применяться как в лабораторных исследованиях (на уровне выходных напряжений в десятки киловольт) для тестирования и калибровки различных устройств, так и в качестве мощных (на уровне сотен и тысяч киловольт) источников напряжения для генерации электромагнитного излучения, для получения сильноточных пучков ускоренных заряженных частиц, рентгеновского излучения, для накачки газовых лазеров, плазменных реакторов и т.д.

В качестве генераторов импульсного напряжения в субмегавольном диапазоне напряжений обычно используются одинарные, а чаще двойные формирующие линии (ОФЛ и ДФЛ) [1, 2]. Широкое использование формирующих линий обусловлено тем, что они просты в изготовлении, совмещают функции накопителя и формирователя импульсов, обладают малым внутренним сопротивлением и обеспечивают на выходе генератора сильноточные высоковольтные импульсы прямоугольной формы, что важно для ряда применений. Длительности формируемых импульсов, вследствие низкой индуктивности и малого

волнового сопротивления линий, лежат в наносекундной области.

Современные ГИН, использующие формирующие линии с масляной и водяной изоляцией — это сложные, крупногабаритные стационарные системы, требующие периодической профилактики и очистки жидкого изолятора.

Целью данной работы является исследование возможных путей создания малогабаритного модульного генератора, но с основными параметрами, близкими к современным ГИН.

Основные схемы ГИН

При срабатывании двойной формирующей линии, заряженной до $U_{зар}$, на согласованной нагрузке $R = 2\rho$ (ρ — волновое сопротивление линии) получаем импульс с напряжением $U_0 = U_{зар}$, (в отличие от одинарной формирующей линии, где выходное напряжение равно половине зарядного напряжения), длительностью $\tau = 2L\epsilon^{1/2}/c$ (здесь L — длина линии, ϵ — диэлектрическая постоянная диэлектрика, заполняющего линию, c — скорость света) и энергоемкостью $W = \epsilon C_0 U_0^2 / 2$ (C_0 — суммарная емкость линий при

использовании в качестве заполняющего линию диэлектрика воздуха).

На рис. 1 представлены ДФЛ в различном исполнении: а — из двух коаксиальных линий и б — двойная коаксиальная линия.

Энергоемкость ГИН зависит от геометрии линий и электрических характеристик заполняющего линию диэлектрика. Варьируя геометрические параметры, можно изменять запасаемую в генераторе энергию. Уменьшение зазора между коаксиальными линиями ведет к возрастанию энергоемкости, но при этом в той же степени

Бондарь Юрий Федорович, научный сотрудник.
Мхеидзе Гурам Павлович, вед. научный сотрудник.
Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН.
Россия, 119991, ул. Вавилова, 38.
Тел.: +7 (499) 135-6387. E-mail: guram@fpl.gpi.ru

Статья поступила в редакцию 18 июля 2013 г.

© Бондарь Ю.Ф., Мхеидзе Г.П., 2013

возрастает напряженность электрического поля в диэлектрике, что может привести к пробоем линии. Геометрическим параметром, позволяющим увеличивать энергоемкость генератора, являются продольные и поперечные размеры линии. Здесь возможными ограничениями могут быть технологичность изготовления и приемлемые линейные размеры устройства.

Удельная энергоемкость генераторов на основе формирующей линии полностью определяется свойствами заполняющего линии диэлектрика: диэлектрической проницаемостью ϵ и напряженностью $E_{пр}$ электрического поля, при которой происходит его пробой. Таким образом, произведение $\epsilon \cdot E_{пр}$ является параметром, определяющим удельную энергоемкость ДФЛ.

В качестве изоляторов в современных генераторах импульсного напряжения на формирующих линиях обычно используются самые разнообразные материалы: воздух ($\epsilon = 1$), пластики и пленочные материалы ($\epsilon = 2-3$), но чаще всего жидкости: масло ($\epsilon = 2-3$, $E_{пр} \approx 30$ кВ/мм), вода ($\epsilon = 81$, $E_{пр} \approx 10$ кВ/мм). Ввиду небольшой величины диэлектрической постоянной указанных материалов (2 — 81) удельная энергоемкость линий мала, и увеличивать энергию в импульсе приходится за счет размеров (обычно диаметра) линий.

Анализ схем современных кабельных ГИН

Зарядка линий до необходимого напряжения обычно осуществляется либо импульсными трансформаторами, либо генераторами по схеме Аркадьева-Маркса, в которых накопительные элементы (конденсаторы) при зарядке соединены параллельно, а при разрядке последовательно).

Для создания импульсных генераторов в диапазоне напряжений 10—500 кВ по схемам ОФЛ и ДФЛ в ряде случаев используются промышленные кабели [3]. Характеристики (диапазон напряжений U , диаметр $2R$, волновое сопротивление ρ , погонная длительность импульса τ/L и погонная энергоемкость W/L) некоторых кабелей даны в табл. 1.

В Институте общей физики РАН был изготовлен ряд генераторов по схеме ДФЛ в кабельном исполнении (КДФЛ) [4, 5].

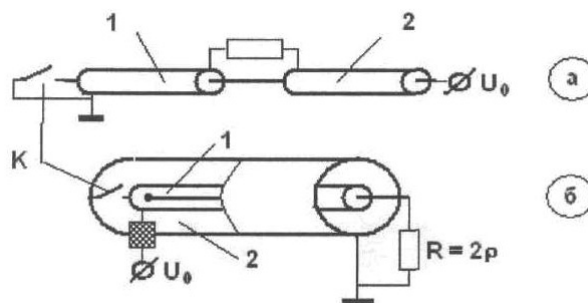


Рис.1. Двойные формирующие линии: а — из двух коаксиальных линий б — двойная коаксиальная линия.

В [4] для создания генератора была изготовлена двойная коаксиальная линия из кабелей РК-50-3-11 и РК-50-11-11. Позже, по заказу, на опытном заводе НИИ кабельной промышленности был изготовлен двойной коаксиальный кабель с волновым сопротивлением внутренней и внешней линий 25 Ом. Характеристики его даны в табл. 1 под № 4..

Очевидные достоинства КДФЛ, особенно на двойном коаксиальном кабеле — простота и технологичность. Генераторы на кабелях конструктивно просты, вышедшие из строя (обычно в результате электрических пробоев) элементы легко заменяемы. Отметим, что в ДФЛ на двойном кабеле практически отсутствуют поля рассеяния.

Для уменьшения зарядного напряжения КДФЛ можно использовать по схеме Маркса (кабельный генератор Маркса — КГМ).

КГМ сочетают упомянутые достоинства КДФЛ и схемы Маркса (умножение напряжения) с простотой коммутации (общий разрядник).

Для проверки работы линий в таком режиме был изготовлен четырехкаскадный кабельный генератор из двойных кабелей (№ 4 в таблице 1) длиной 4 м [6]. Схема КГМ дана на рис. 2.

Зарядное напряжение составляло 200 В, так что на выходе на нагрузке $R = 200$ Ом ожидался импульс напряжения с амплитудой 800 В (коэффициент умножения $k = 4$) и длительностью 40 нс. Измерения показали, что коэффициент умножения $k = U_{ввых} / U_0$ был существенно меньше, а именно, в пределах 2—3, а форма импульса оказалась колоколообразной. Очевидно, что и коэффициент

Таблица 1

№	U	2R, мм	ρ , Ом	τ / L , нс/м	W / L, Дж/м
1	До 30 кВ	11	50	≈ 10	0.09 при 30 кВ
2	До 300 кВ	28	25		18 при 300 кВ
3	До 500 кВ	40	50		25 при 500 кВ
4	До 30	7	$\rho_1 = \rho_2 = 25$		0.18 при 30 кВ

умножения, и форма импульса зависели от взаимного расположения кабелей. Низкий коэффициент умножения и колоколообразная форма импульса (вместо прямоугольной) связаны с наличием паразитных емкостей $C_{\text{пар}}$ между линиями. Емкость коаксиальных линий $C_1 = C_2 = 0,55\epsilon L/\ln(D/d)$, их суммарная емкость при зарядке линий будет $C = 4,4\epsilon L/\ln(D/d)$. При $D/d \approx \epsilon$ и $\epsilon \approx 2,5$ имеем $C \approx 11L$ [пФ]. Емкость при разрядке (емкость в ударе) равна $C_{\text{уд}} \approx C/4 = 2,75$ пФ.

При срабатывании ключа К (т.е. при разрядке линий) между линиями возникает напряжение, что ведет к зарядке паразитных емкостей $C_{\text{пар}}$. Емкость $C_{\text{пар}}$ можно оценить по формуле емкости между проводами диаметром d и длиной L , а именно, $C_{\text{пар}} = 0,12\epsilon L/\ln(2a/d)$, где a — расстояние между проводами. Для воздуха $\epsilon = 1$, но следует учесть обычно покрывающий линии (кабели) слой пластика с $\epsilon \approx 2,5$.

Легко убедиться, что суммарная паразитная емкость между линиями сравнима с емкостью в ударе самих формирующих элементов, так что существенная часть энергии при срабатывании КГМ идет на зарядку паразитных емкостей, в результате чего уменьшается коэффициент умножения КГМ и искажается форма импульса. Отсюда же следует низкая погонная энергоемкость и малая длительность импульса.

КГМ на керамике

Так как удельная энергоемкость КГМ зависит от электрических характеристик заполняющего линии диэлектрика, естественно возникает мысль использовать диэлектрик с высоким значением диэлектрической постоянной, например, конденсаторную керамику. Диэлектрическая постоянная для некоторых керамик дана в табл. 2. При использовании диэлектрика с большим ϵ должно существенно уменьшится отношение паразитная емкость — емкость линий и, следовательно, доля энергии, расходуемой на зарядку паразитных емкостей. В результате, на выходе КГМ можно ожидать получения импульса прямоугольной формы с амплитудой $U \approx kU_{\text{зар}}$.

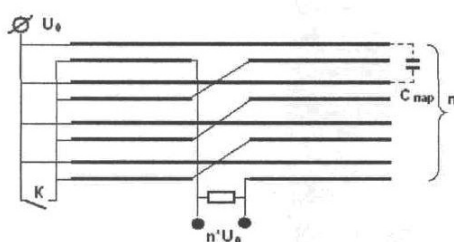


Рис. 2. Схема кабельного генератора Маркса.

Таблица 2

Марка керамики	ϵ
ТК-20	29
Т-80	78 – 88
Т-150	150 – 165
Т-900	900 – 1000

Итак, для увеличения энергоемкости линий, работающих в диапазоне напряжений 10–20 кВ по схеме ДФЛ предлагается в качестве изолятора в линиях использовать конденсаторную керамику с диэлектрической постоянной $\epsilon \geq 900$. Использование керамики накладывает ограничения на геометрию (размеры) формирующей линии. Технологически длина керамических элементов не может существенно превышать $L \approx 100$ мм, диаметр $D \approx 40$ мм. По сравнению с промышленным кабелем аналогичных размеров (диэлектрическая постоянная наполнителя $\epsilon_1 \approx 2,5$) в линии с керамическим диэлектриком ($\epsilon_2 \approx 900$) при одинаковых зарядных напряжениях удельная энергоемкость увеличивается в $\epsilon_2/\epsilon_1 \approx 400$ раз, длительность импульса увеличивается, а волновое сопротивление линии уменьшается (соответственно увеличивается ток в согласованной нагрузке) в $(\epsilon_2/\epsilon_1)^{1/2} \approx 20$ раз. Напряженность электрического поля, выдерживаемая керамикой, порядка 50 кВ/см. Для керамики $\epsilon \cdot E \approx 50000$, в то время как для пленочных материалов и масла эта величина ≈ 700 , а для воды ≈ 12000 . Следовательно, имеем выигрыш в удельной энергоемкости от 4 (диэлектрик — вода) до 71 (диэлектрик — пленочные материалы).

Предполагаем, что использование в качестве наполнителя в линиях керамики с диэлектрической постоянной порядка 900–1000 позволит создать сверхкомпактный, малогабаритный модульный генератор сильнооточный источник импульсного напряжения в диапазоне 100–200 кВ.

Соответствующий модуль представляет собой двойную линию с отношениями внешнего и внутреннего цилиндров $R_1/r_1, R_2/r_2$ и длиной L , заполненную конденсаторной керамикой с диэлектрической постоянной $\epsilon \geq 900$. Условно схема модуля генератора представлена на рис. 3. Здесь n модулей соединяются по схеме Аркадьева-Маркса. Важное требование к керамическим элементам модуля ДФЛ — отсутствие в теле керамики и между проводящим медным (серебряным) слоем и керамикой трещин, раковин, в которых $\epsilon = 1$.

Волновое сопротивление линий зависит от отношения R/r . От R/r зависит также и напряженность поля в диэлектрике (напряженность максимальна на поверхности электрода с минимальным радиусом). Напряженность поля в диэлектрике

Таблица 3

R/r	ρ, Ом	W/L, Дж/см			
		U ₀ =10 кВ	U ₀ =15 кВ	U ₀ =20 кВ	U ₀ =25кВ
1.4	0.65	0.16	0.35	0.64	0.98
1.6	0.91	0.11	0.25	0.44	0.70
1.8	1.14	0.09	0.20	0.36	0.56
2.0	1.35	0.08	0.17	0.32	0.47
2.2	1.53	0.07	0.15	0.28	0.42
2.4	1.70	0.06	0.13	0.24	0.38

минимальна при отношении $R/r \approx \epsilon$, но при этом велико отношение максимального и минимального радиусов керамических заготовок модуля: R_1/r_2 порядка ϵ^2 . Сопротивление линий при этом $\rho \approx 2$ Ом.

Зависимость волнового сопротивления линий и энергоемкости модуля от отношения R/r (для керамики с $\epsilon = 900$) иллюстрирует табл. 3 (энергоемкость дана для четырех значений зарядного напряжения, 10, 15, 20 и 25 кВ).

В табл. 4 представлены различные варианты модулей. Даны габариты (r_2, R_2 и $\Delta_2 = R_2 - r_2$ для линии Б; r_1, R_1 и $\Delta_1 = R_1 - r_1$ для линии А) образцов, волновое сопротивление пиний $\rho_1 = \rho_2 = \rho$, ориентировочное значение зарядного напряжения и погонная энергоемкость одного модуля.

Использование конденсаторной керамики в качестве наполнителя в двойных формирующих линиях позволит создать сверхкомпактный модуль для генератора.

Ориентировочные электрические и геометрические параметры модуля:

Напряжение зарядки, выходное напряжение, кВ	10–20
Волновое сопротивление, Ом	0.8–2
Ток, кА	8–10
Длительность импульса, нс	20–30
Размеры, длина, мм	100–150
Диаметр, мм	40–50
Удельная энергоемкость модуля Дж/дм ³	12–20



Рис. 3. Модуль генератора.

Ориентировочные электрические и геометрические параметры десятикаскадного генератора:

Амплитуда импульса, кВ	2 0 0
Ток, кА	8
Длительность импульса, нс	20
Размеры, длина, дм	2
Диаметр, мм	2.5
Удельная энергоемкость генератора, Дж/дм ³	3.3

Модульная компоновка генератора позволяет сравнительно просто менять выходное напряжение генератора изменением числа модулей.

Варианты компоновки модулей зависят от характера применения генератора. Например, для чемоданного варианта более целесообразна плоская компоновка. На рис. 4 и 5 представлены кольцевой десятикаскадный и плоский пятикаскадный варианты.

Фактором, ограничивающим возможность увеличения напряжения увеличением числа модулей, является разрядник. Из схемы генератора видно, что ток в разряднике равен $I = nU/2\rho$.

Возможная область применения подобных генераторов достаточно широка.

1. Источники ЭМИ для тестирования оборудования на помехоустойчивость. Отметим, что одиночный импульс на выходе имеем при согласовании генератора с антенной. При сопротивлении нагрузки больше 2ρ имеем цуг импульсов с частотой 200–250 МГц. При частоте излучаемой волны 200 МГц на расстоянии ~ 1 м АНТЕННЫЙ БЛОК обеспечивает электрическое поле 30–60 В/см на 1 кВ напряжения генерируемого импульса. Таким образом при $U = 100–200$ кВ можно ожидать электрическое поле 3–12 кВ/см.

2. Источник питания для различных систем (источники пучков электронов и ионов, СВЧ системы и т.д.)

Таблица 4

R/r	r ₂ , мм	Δ ₂ , мм	R ₂ , мм	r ₁ , мм	Δ ₁ , мм	R ₁ , мм	ρ, Ом	U ₀ , кВ	W/L, Дж/см
1.6	6	3.6	9.6	10.6	6.36	16.96	0.91	15-20	0.25-0.45
1.8	6	4.8	10.8	11.6	9.6	21.4	1.14	20-25	0.36-0.56
1.6	5	3	8.0	9.0	5.4	14.40	0.91	15	0.25
1.8	5	4	9.0	10.0	8	18.00	1.14	20	0.36
2.0	5	5	10.0	11.0	11	22.00	1.35	25	0.47
1.8	4	3.2	7.2	8.2	6.5	14.76	1.14	15	0.20
2.0	4	4	8.0	9.0	9	18.00	1.35	20	0.30
2.2	4	4.8	8.8	9.8	11.75	21.56	1.53	20-25	0.27-0.42

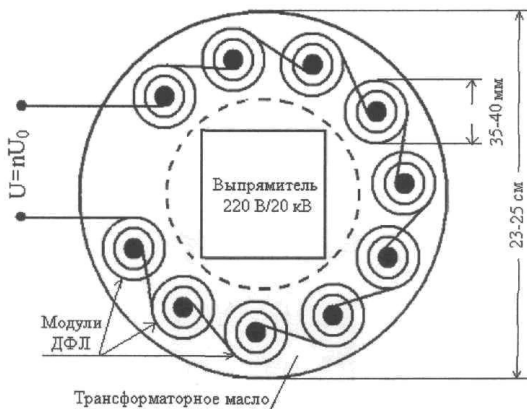


Рис. 4. Кольцевой вариант модульного генератора

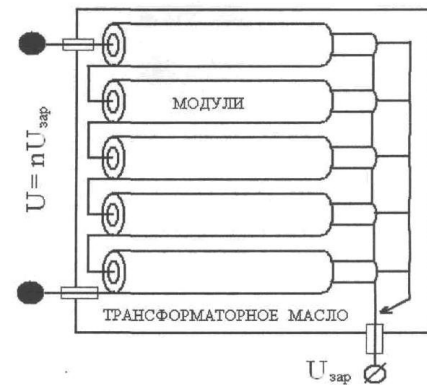


Рис. 5. Плоский вариант модульного генератора.

3. Для калибровки измерительных элементов.

Проблемы создания КГМ на керамике

Использование конденсаторной керамики в двойных формирующих линиях позволит создать переносные, «чемоданного» типа генераторы импульсного напряжения с параметрами, сравнимиыми с параметрами стационарных установок.

Однако простота предложения (использовать конденсаторную керамику в линиях) иллюзорна. Она связана к необходимости решения трех весьма нетривиальных проблем, каждая из которых представляет самостоятельный и большой интерес.

1. Проблема разрядника. Как видно из схемы кабельного генератора Маркса, при срабатывании коммутатора К начинают разряжаться n линий с волновым сопротивлением в диапазоне $\rho = 0.673-1.175$, заряженных до напряжения $U_{зар} = 10-25$ кВ. Следовательно, коммутатор должен обеспечить ток порядка $I \approx nU_{зар}/\rho$ и время нарастания тока должно быть $t \ll \tau$. Разрядников с такими уникальными характеристиками не существует.

2. Проблема сочетания участков модуля с разными значениями диэлектрической постоянной.

3. Большую опасность представляют торцы модулей, где керамика граничит со средой с малым (порядка 1-3) значением диэлектрической постоянной. Необходимое условие на границе сред с разными ϵ — во избежание пробоя силовая линия электрического поля не должна пересекать две среды.

3. Проблема работы конденсаторной керамики в наносекундном режиме, специфичной для формирующих линий.

На вопрос, разрешимы ли эти три проблемы, ответить можно лишь работая над созданием сверхминиатюрного сильноточного высоковольтного модульного генератора импульсного напряжения.

Заключение

В работе обоснована возможность увеличения удельной энергоемкости кабельного генератора Маркса путем использования в качестве диэлектрика конденсаторной керамики с диэлектрической постоянной $\epsilon \approx 900$, что позволит создать малогабаритный модульный генератор с параметрами $U \approx 200$ кВ, $I \approx 8$ кА, $\tau \approx 20$ нс и удельной энергоемкостью порядка $3,3$ Дж/дм³.

Литература

1. Месяц А., Насибов А.С., Кремнев В.В. Формирование наносекундных импульсов высокого напряжения. Москва. Изд. «Энергия». 1970.
2. Fitch R. A., Howell V. T. S. // Proc. IEE. 1964. V. 111. No. 4. P. 849
3. Корон Е. Д. // ПТЭ. 1981. № 1. С. 124.
4. Бондарь Ю.Ф., Гоманько А. А., Кременцов В. И. и др. // ПТЭ. 1991, № 1. С. 142.
5. Бондарь Ю.Ф., Мхеидзе Г.П., Петров Н.И. // КСФ ФИАН. 1999. № 3. С. 51
6. Бондарь Ю.Ф., Мхеидзе Г.П. // Прикладная физика. 2005. № 3. С. 101

Thermomechanical sensitivity of uncooled bimaterial detector of IR-range fabricated by technology of microoptomechanical systems

Yu.F. Bondar and *G.P. Mkheidze*

Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences
38 Vavilov str., Moscow, 199991, Russia
E-mail: guram@fpl.gpi.ru

To increase the specific energy density of the cable Marx generator we propose to use a dielectric capacitor ceramics with a dielectric constant $\varepsilon \approx 900$, which will allow to create small modular generator with parameters $U \approx 200$ kV, $I \approx 8$ kA, $\tau \approx 20$ ns and energy density of the order of 3.3 J/dm³.

PACS: 07.50.-e

Keywords: generator, pulse voltage, ceramics, high voltage.

Bibliography — 6 references

Received July 18, 2013