

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

13-86-350

В.Д.Аксиненко, Е.А.Дементьев, Н.И.Каминский,
А.Т.Матюшин, В.Т.Матюшин

**ИМПУЛЬСНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР
ВМЕСТО ЗАРЯДНОЙ ИНДУКТИВНОСТИ
В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ГЕНЕРАТОРАХ**

Направлено в журнал
"Приборы и техника эксперимента"

1986

В работе /1/ описан генератор для питания двухметровой стримерной камеры, в котором двойная формирующая линия (ДФЛ) заряжается через индуктивность от генератора импульсных напряжений (ГИН) на основе промышленной батареи конденсаторов ГИН-500-0.02/5. Недостатком такого заряда линии является несогласованный режим ее работы вследствие разных значений емкости ГИН "в ударе" (~ 4 нФ) и емкости ДФЛ ($\sim 0,6$ нФ). Значительная часть запасенной энергии остается и рассеивается в ГИНе, снижая долговечность его составных элементов.

При избыточном значении емкости ГИН "в ударе" представляется заманчивым заменить индуктивность, через которую осуществляется заряд линии, на импульсный трансформатор (ИТ) без сердечника по схеме, предложенной в /2/. Анализ этой схемы, произведенный в /3/ без учета потерь в разрядниках и колебательных контурах, показал, что при этом можно обеспечить полную передачу энергии в нагрузку и повысить напряжение заряда линии, поэтому несомненный интерес представляет проверка ее работоспособности в практической конструкции генератора с выходным напряжением ~ 500 кВ.

Принцип действия заключается в следующем (рис. 1а). В исходном

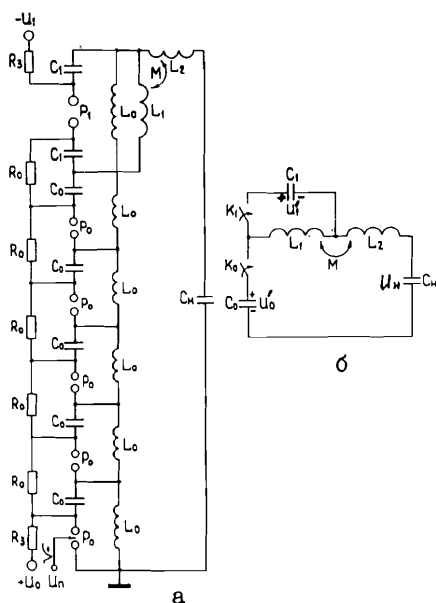


Рис. 1. Принципиальная (а) и эквивалентная (б) электрические схемы генератора.

состоянии накопительные емкости пятиступенного ГИН C_0 и одна накопительная емкость ИТ C_1 через зарядные резисторы R_3 , R_0 и индуктивности L_0 заряжены до напряжения $+U_0$, а вторая накопительная емкость ИТ C_1 через резистор R_3 и те же индуктивности L_0 - до напряжения $-U_1$ от двухполярного источника постоянного напряжения (можно использовать однополярный источник и одну накопительную емкость ИТ). При срабатывании разрядников P_0 и P_1 емкости C_0 и C_1 разряжаются через импульсный трансформатор с индуктивностями обмоток L_1 и L_2 и взаимной индуктивностью M

на емкость нагрузки C_H (емкость ДФЛ), где выделяется импульс напряжения, максимальная амплитуда которого зависит от соотношений элементов схемы и отношения напряжений $m = U'_0/U'_1$, где $U'_0 = 5U_0$ - выходное напряжение ГИИ, $U'_1 = U_1 + U_0 = 2U_0$ (при $U_0 = U_1$) - первичное напряжение ИТ.

Анализ переходного процесса в эквивалентной схеме (рис. 1б) рассмотрен в [3]. Здесь приводятся некоторые результаты, представляющие практический интерес при выборе параметров генератора.

Изменение напряжения на емкости нагрузки U_H в зависимости от времени t без учета затуханий в контурах трансформатора и при одновременном включении U'_0 и U'_1 , как показано на рис. 1б, при одновременном замыкании ключей K_0, K_1 будет следующим:

$$U_H(t) = m U'_1 \frac{g}{(g+1)} [1 + 0,5(q-1) \cos \omega_1 t - 0,5(q+1) \cos \omega_2 t],$$

где $g = \sqrt{1 + C_1/m^2 C_2}$, $C_2 = C_0 C_H / (C_0 + C_H)$, $g = C_0 / C_H$,

$$\omega_1 = \sqrt{A(1+X)}, \quad \omega_2 = \sqrt{A(1-X)}, \quad X = \sqrt{1 - B/A^2},$$

$$B = 1/[L_1 C_1 L_2 C_2 (1-K^2)], \quad A = [(1+2Kn+n^2)C_2 + C_1]/[2C_1 C_2 L_2 (1-K^2)],$$

$$K = M/\sqrt{L_1 L_2}, \quad n = \sqrt{L_2/L_1}.$$

Напряжение $U_H(t)$ является суперпозицией двух колебаний с частотами ω_1 и ω_2 , и максимальное зарядное напряжение ДФЛ при $\omega_1/\omega_2 = 2$ (т.е. при $X=0,6$) получается на втором полупериоде и составляет

$$U_{Hm} = m U'_1 g(q+1)/(g+1).$$

Эффективность энергопередачи $\eta = [g(q+1)^2]/[(g+1)(q^2+g)]$ будет максимальной ($\eta = 1$) при условии $g = q$. В этом случае $U_{Hm} = m q U'_1 = q U'_0$ (т.е. можно повысить зарядное напряжение линии в q раз по сравнению с выходным напряжением ГИИ), а время заряда линии до максимума равно $t_3 = \pi \sqrt{16 L_1 C_1 q / (q-0,5)}$ и сравнимо с t_3 в схеме обычного ИТ. Однако, в отличие от ИТ, здесь получается меньшее значение отношения максимума первой полувоины напряжения к максимуму второй при реальных значениях q , оно равно $\delta U_{Hm} = U_{Hm1}/U_{Hm2} = (3q-5)/[16(q^2-1)]$.

Кроме того, в отличие от ИТ, в котором коэффициент электромагнитной связи $K=0,6$ при соотношении частот $\omega_1/\omega_2 = 2$, в данной схеме при таком же соотношении частот этот коэффициент зависит от значений q и m :

$$K = \frac{[Xm(q^2-1)/(q-X)]-1}{n}, \quad n = \sqrt{\frac{(q^2-1)(m^2q-2mX+m^2X)}{(q-X)} + 1},$$

т.е. при малых значениях q и m значение $K < 0,6$ (например, при $m=1$ и $q \approx 1,67$ значение $K=0$).

При согласном включении зарядных напряжений U'_0 и U'_1 , т.е. при изменении полярности U'_0 или U'_1 , в схеме не обеспечивается полная передача запасенной энергии в линию, однако время заряда линии до максимума при этом уменьшается в $2\sqrt{(q+X)/(q-X)}$ раз.

Выбор основных элементов осуществлялся исходя из следующих соображений. Для импульсного заряда ДФЛ с емкостью $C_H \approx 0,6$ нФ накопительной емкостью $C_0 = 4$ нФ (рис. 1б) является емкость "в ударе" генератора на основе ГИИ-500-0.02/5, описанного в работе [1]. При этом $g = C_0/C_H \approx 6,7$. С целью уменьшения требуемых значений K, m и $C_1 = m^2 q(q-1)C_H$ используется двуполярный источник зарядного напряжения, при этом выбрано значение $m=2,5$. Из имеющихся в наличии высоковольтных малоиндуктивных конденсаторов в качестве накопительной емкости C_1 выбраны, из-за ограничений по месту, два конденсатора типа ИМ-70-0,1УЗ. Хотя в этом случае и не происходит полной передачи запасенной энергии в линию (измеренное значение $C_1=45$ нФ вместо требуемого $C_1=140$ нФ, т.е. $g \approx 3,8 < g$), расчетная эффективность энергопередачи достаточно высока, $\eta \approx 0,94$. При резонансном заряде, т.е. при $X=0,6$, требуется ИТ с параметрами

$n = 10,2$ и $K=0,52$. Для уменьшения влияния "паразитной" индуктивности первичного контура, равной $\sim 0,4$ мкГн ($0,3$ мкГн - индуктивность двух конденсаторов ИМ-70-0,1УЗ и $0,1$ мкГн - индуктивность разрядника ИТ и подводных проводников), и уменьшения потерь напряжения в первичном контуре ИТ изготовлен трансформатор с $L_1 = 3$ мкГн, $L_2 = 440$ мкГн и $M=17,5$ мкГн, т.е. эффективные значения параметров ИТ составили $n_{эф} \approx 11,4$ и $K_{эф} \approx 0,45$. В этом случае $\omega_1/\omega_2 \approx 1,9$ ($X=0,56$), расчетные потери зарядного напряжения линии и энергии из-за меньшего, чем требуется, значения K составляют $\sim 2\%$ и $\sim 4\%$ соответственно.

С целью экспериментальной проверки преимуществ и недостатков предложенной схемы был изготовлен простой импульсный трансформатор, способный выдержать в период испытаний реальные напряжения. Он был установлен вместо индуктивности в генераторе, описанном в [1]. Конструкция этой части генератора с трансформатором дана на рис. 2. Первичная обмотка ИТ (9) - три витка медного тросика $\phi 6$ мм - расположена в форме спирали Архимеда в один слой, вторичная обмотка (10) - 42 витка в два слоя, выполненных кабелем типа РК-75-9-15 без экранирующей оплетки. Между обмотками расположен изолятор (11) из оргстекла. Для более равномерного распределения напряжения по виткам вторичной обмотки установлено разрезное охранное кольцо (13) из медной трубки диаметром 20 мм. В качестве разрядника ГИИ и ИТ использовался один

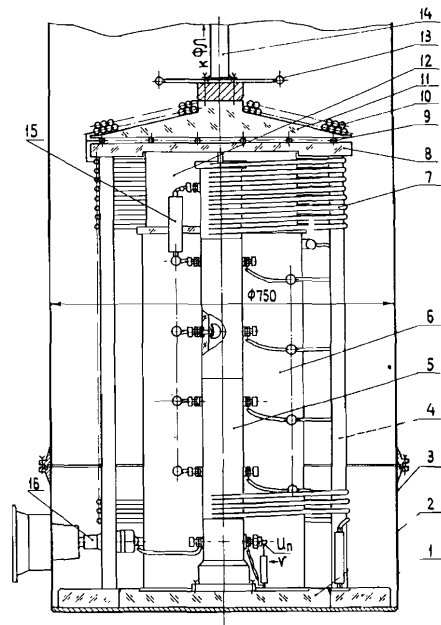


Рис. 2. Эскиз конструкции генератора: 1-основание защитного соленоида; 2-основание ГИН; 3-кожух генератора; 4-каркас защитного соленоида; 5-модульный разрядник; 6-ГИН-500-0,02/5; 7-защитный соленоид; 8-основание ИТ; 9-первичная обмотка ИТ; 10-вторичная обмотка ИТ; 11-межобмоточный изолятор; 12-накопительные емкости ИТ; 13-охранное кольцо; 14-выход высокого напряжения; 15-зарядный резистор конденсаторов ИТ; 16-ввод высокого постоянного напряжения.

разрядник /4/, собранный из модулей-секций в виде трубы (5) из оргстекла. Вся конструкция генератора помещена в стальной кожух (3) и заполнена трансформаторным маслом.

На рис. 2а приведена осциллограмма зарядного напряжения ДФЛ без срабатывания ее разрядника. Расчетная кривая (пунктир) построена при указанных параметрах генератора без учета затуханий в контурах. При измерениях использовались осциллограф И2-7 и омический делитель напряжения на основе малоиндуктивных резисторов ТВО-60 (высоковольтное плечо) и ТВО-2 (низковольтное плечо). Осциллографирование проводилось при следующем режиме работы генератора: зарядное напряжение конденсаторов ГИН составляло + 25 кВ, а конденсаторов ИТ - ± 25 кВ, в разряднике генератора-воздух при атмосферном давлении, в разряднике линии-алегас при давлении 0,55 МПа (зазор ~ 11 мм). Расчетные значения амплитуд первого и второго максимумов зарядного напряжения линии в этом режиме составляют 80 и 512,5 кВ при времени заряда до максимумов 650 и 1825 нс. Экспериментальные значения составили ~ 75 и 425 кВ при времени заряда 675 и 1800 нс. Точность измерений амплитуды и времени заряда по осциллограммам оценивается в 7-10%. Потери зарядного напряжения линии составляют ~ 17%.

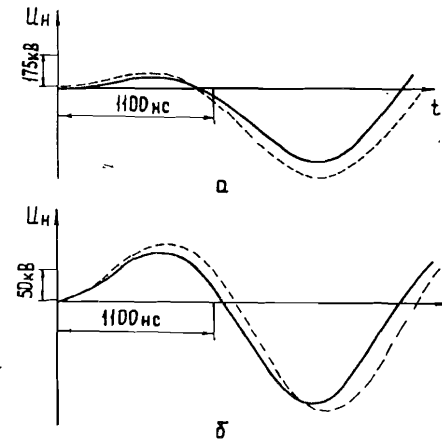


Рис. 3. Расчетные (пунктирные) и экспериментальные (сплошная) кривые зарядного напряжения линии в ИТ (б) и в предложенном генераторе (а).

Следует отметить, что в генераторе данного типа амплитуда первого максимума зарядного напряжения значительно меньше, чем в схеме с ИТ. Для сравнения на рис. 3б приведены расчетная (пунктирная) и экспериментальная (сплошная) кривые зарядного напряжения линии в схеме с "чистым" ИТ, т.е. при отключенном ГИН-500-0,02/5. Осциллографирование проводилось при зарядном напряжении накопительных конденсаторов ИТ, равном ± 12,5 кВ, ИТ находился в воздухе, кожух снят. Видно, что в схеме с ИТ амплитуда первого максимума зарядного напряжения линии больше половины амплитуды второго (рабочего) максимума. Максимальные расчетные и экспериментальные значения амплитуды зарядного напряжения линии в этом случае равны 180 и 167 кВ соответственно, т.е. потери напряжения в ИТ составляют ~ 7%. Увеличение потерь напряжения в предложенном генераторе заряда до 17% связано с потерями в ГИН и задержкой срабатывания разрядника ИТ относительно разрядника ГИН. Замечено (на самопробое), что меньшие потери напряжения наблюдаются в случае, когда первым срабатывает разрядник ИТ.

Заданная амплитуда (500 кВ) выходного импульса генератора была достигнута при зарядном напряжении конденсаторов ГИН и ИТ - 50 кВ вместо 85 кВ без ИТ, что в 1,7 раза меньше, чем при заряде ДФЛ через индуктивность. При этих испытаниях амплитуда импульса заряда ДФЛ достигала 800 кВ, дальнейшее повышение зарядного напряжения привело к пробоям межобмоточного изолятора ИТ.

Таким образом, результаты испытаний генератора с ИТ вместо индуктивности по новой схеме показали хорошее совпадение расчетных и экспериментальных результатов. Схема обеспечивает лучшее согласо-

ние ГИИ с емкостной нагрузкой при повышении зарядного напряжения ДФЛ. При разрешении проблемы высоковольтной межобмоточной изоляции (например, спиральный тип ИТ ^{15/}) в данной конструкции генератора можно увеличить амплитуду выходного импульса до 1 МВ и выше.

Однако принципиальным моментом для работы такого генератора со стримерной камерой на ускорителе остается повышенная величина задержки (1,5-2 мкс) выходного импульса. Тем не менее в ряде устройств, а также при работе камеры в режиме запоминания следов (двухимпульсное питание) это обстоятельство не является недостатком.

В заключение авторы выражают благодарность Графову Н.Н. и Садиллову В.П. за помощь в изготовлении ИТ, Ряховскому В.Н. и Хусаинову Э.К. за помощь в монтаже генератора, а также Глаголевой Н.С. и Нургожину Н.Н. за полезные обсуждения.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Аксиненко В.В. и др. ОИЯИ, 13-86-149, Дубна, 1986.
2. Аксиненко В.Д. и др. Авторское свидетельство СССР № 989747 от 03.06.81. Бюл. ОИПОТЭ, 1983, № 2, с.259.
3. Аксиненко В.Д. и др. ОИЯИ, 13-82-764, Дубна, 1982.
4. Аксиненко В.Д. и др. ОИЯИ, 13-83-184, Дубна, 1983; ПТЭ, 1984, № 2, с.101.
5. Rohwein G.J. IEEE Trans. Nucl.Sci., 1979, vol. NS5-26, No.3, p.4211.

Рукопись поступила в издательский отдел
3 июня 1986 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

Д2-82-568	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
Д9-82-664	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
Д3,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.
Д11-83-511	Труды совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1982.	2 р. 50 к.
Д7-83-644	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983.	6 р. 55 к.
Д2,13-83-689	Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983.	2 р. 00 к.
Д13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р. 50 к.
Д2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р. 30 к.
Д1,2-84-599	Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984.	5 р. 50 к.
Д17-84-850	Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. /2 тома/	7 р. 75 к.
Д10,11-84-818	Труды V Международного совещания по проблемам математического моделирования, программированию и математическим методам решения физических задач. Дубна, 1983	3 р. 50 к.
	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984 /2 тома/	13 р. 50 к.
Д4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1985.	3 р. 75 к.
Д11-85-791	Труды Международного совещания по аналитическим вычислениям на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1985.	4 р.
Д13-85-793	Труды XII Международного симпозиума по ядерной электронике. Дубна 1985.	4 р. 80 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

**ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Индекс	Тематика
1.	Экспериментальная физика высоких энергий
2.	Теоретическая физика высоких энергий
3.	Экспериментальная нейтронная физика
4.	Теоретическая физика низких энергий
5.	Математика
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия
7.	Физика тяжелых ионов
8.	Криогеника
9.	Ускорители
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных
11.	Вычислительная математика и техника
12.	Химия
13.	Техника физического эксперимента
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16.	Дозиметрия и физика защиты
17.	Теория конденсированного состояния
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники
19.	Биофизика

Аксиненко В.Д. и др.

13-86-350

Импульсный трансформатор вместо зарядной индуктивности в высоковольтных генераторах

Приводится новая принципиальная схема импульсного заряда двойной формирующей линии /ДФЛ/ на основе комбинации генератора импульсных напряжений /ГИН/ по схеме Аркадьева-Маркса и импульсного трансформатора /ИТ/ без сердечника. Даны основные расчетные соотношения для согласованного /по передаче энергии/ режима ее работы. Описаны экспериментальные результаты проверки работы схемы в генераторе высоковольтных наносекундных импульсов с амплитудой до 500 кВ. Замена зарядной индуктивности импульсным трансформатором позволила лучше согласовать емкость пятиступенного ГИН "в ударе" /-4 нФ/ с емкостью ДФЛ /-0,6 нФ/ и повысить напряжение заряда линии в 3,4 раза по сравнению с выходным напряжением ГИН; время заряда линии при этом составило ~1,8 мкс. На активной нагрузке /-38 Ом/, имитирующей импеданс стримерной камеры, заданная амплитуда /-500 кВ/ выходного импульса генератора была достигнута при зарядном напряжении конденсаторов ГИН и ИТ, равном 50 кВ, что в 1,7 раза меньше, чем при заряде ДФЛ через индуктивность.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1986

Перевод Л.Н.Барабаш

Aksinenko V.D. et al.

13-86-350

Pulse Transformer Instead of Charge Inductance in High-Voltage Generators

A new electrical circuit used to charge a pulse forming line (Blumlein) is proposed. It is based on the combination of an Arkadiev-Marx generator and a pulse transformer with no core. Some results of working the circuit in a high-voltage generator with a pulse amplitude of 500 kV are described. The use of the pulse transformer in lieu of charge inductance improved the energy transfer coefficient from the Arkadiev-Marx generator with a -4 nF capacitance to the Blumlein with a ~0.6 nF capacitance and increased the Blumlein charge voltage by a factor of 3.4 as compared to the Marx generator output voltage. The rise time of the Arkadiev-Marx output voltage on the Blumlein is 1.8 mks. The amplitude of a 500 kV Blumlein output voltage on a -38 Ohm load has been obtained using a charge voltage of 50 kV on the condensers of the Arkadiev-Marx generator and the pulse transformer.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energy, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1986