

## Линейный импульсный трансформатор с частотой работы 5 Гц

*С.С. Кондратьев\*, А.А. Жерлицын, В.М. Алексеенко*

*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

*\*kondratiev@oit.hcei.tsc.ru*

**Абстракт.** Представлены конструкция и результаты исследования линейных импульсных трансформаторов с коэффициентом трансформации  $k = 1$  и  $2$ , а также двух последовательно соединенных трансформаторов с  $k = 2$ . Отличительными особенностями данных трансформаторов являются частотный режим работы, отсутствие в их изоляции жидкого диэлектрика, размещение емкостного накопителя энергии внутри корпуса индуктора и непосредственное подключение его к первичному витку без использования высоковольтных кабелей. Емкость накопителя трансформатора 150 нФ, запасенная энергия 188 Дж при зарядном напряжении 50 кВ. Трансформаторы позволяют передать около 60% запасенной энергии на «согласованную» нагрузку за характерное время около 1 мкс. Экспериментальные данные состоят из более чем 30 тысяч импульсов, выполненных в частотном режиме работы с частотой следования импульсов 1–5 Гц. Реализована стабильная частотная работа трансформатора с джиттером ~20 нс.

**Ключевые слова:** импульсный трансформатор, импульсная энергетика.

### 1. Введение

Важным элементом электроразрядной технологии является высоковольтный импульсно-периодический генератор, обеспечивающий питание разряда. В связи с этим требования, предъявляемые к параметрам такого генератора достаточно жесткие.

В некоторых случаях генераторы на основе линейного импульсного трансформатора [1, 2] могут быть предпочтительнее более традиционным генераторам Аркадьева-Маркса. Конструкция линейного импульсного трансформатора позволяет уменьшить объем высоковольтной изоляции, упростить обслуживание конденсаторов, разрядников и т.д. Кроме того, линейный трансформатор может быть спроектирован так, чтобы обеспечить повышение выходного напряжения за счет последовательного соединения нескольких индукторов или трансформаторов, при этом общий вторичный виток охватывает сердечники всех трансформаторов. Однако, для использования в технологических целях необходимо решить ряд вопросов и, в частности, вопрос стабильной длительной работы на заданной частоте.

В данной работе представлены конструкция и результат экспериментов линейных импульсных трансформаторов с воздушной изоляцией при атмосферном давлении, предназначенных для использования в прикладных целях. Отличительными особенностями данных трансформаторов, помимо частотного режима работы, являются: отсутствие жидкого диэлектрика в изоляции трансформатора, размещение внутри корпуса (индуктора) емкостного накопителя и непосредственное подключение его к первичному витку без использования высоковольтных кабелей.

### 2. Схема линейного импульсного трансформатора

Схема трансформатора с коэффициентом трансформации  $k = 1$  показана на Рис.1а. Емкостной накопитель энергии  $C$  подключен через разрядник  $S$  к индуктору с ферромагнитным сердечником. Накопитель энергии и индуктор образуют первичный виток трансформатора. Вторичный виток образован внутренним стержневым электродом и корпусом трансформатора. Один конец стержневого электрода соединен с корпусом ступени. Другой, высоковольтный конец, подключен к нагрузке ( $R_{load}$ ).

При подключении накопителя к нескольким индукторам напряжение нагрузки увеличивается, а ток нагрузки уменьшается примерно пропорционально количеству

индукторов при сохранении мощности нагрузки. Схема трансформатора с двумя индукторами и коэффициентом трансформации  $k = 2$  представлена на Рис.1б.

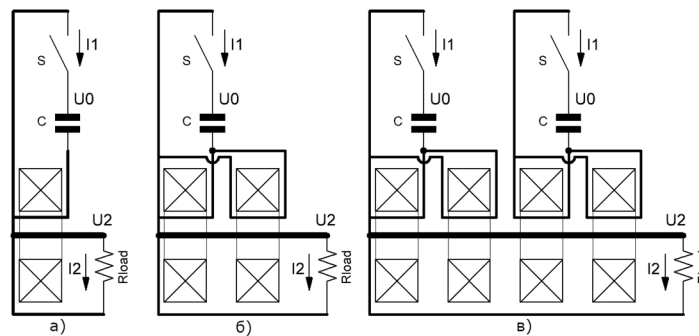


Рис.1. Схема импульсного трансформатора: а) трансформатор с коэффициентом трансформации  $k = 1$ ; б) трансформатор с коэффициентом трансформации  $k = 2$ ; в) последовательное соединение двух трансформаторов с коэффициентом трансформации каждого  $k = 2$ .  $U_0$  – зарядное напряжение,  $U_2$  – напряжение на нагрузке,  $I_1$ ,  $I_2$  – токи в первичном и вторичном витках.

Повышение напряжения нагрузки и поддержание тока нагрузки достигается последовательным подключением нескольких трансформаторов к общему вторичному витку. Схема с последовательным соединением двух трансформаторов с коэффициентом трансформации каждого  $k = 2$  показана на Рис.1в.

### 3. Конструкция линейного импульсного трансформатора

На Рис.2 показана фотография импульсного трансформатора. Емкостной накопитель трансформатора состоит из шести высоковольтных импульсных конденсаторов К75-74, 40 кВ, 0.1 мкФ, соединенных параллельно-последовательно. Три конденсатора, соединенных параллельно, объединены в один блок. Два блока соединены последовательно. Эквивалентная емкость накопителя энергии составляет около 150 нФ. Согласно паспорту производителя [3] допустимый размах импульсного напряжения конденсатора К75-74 не должен превышать 40 кВ. Таким образом, допустимый размах импульсного напряжения на двух последовательно соединенных конденсаторах составляет 80 кВ. В режиме разряда, близком к короткому замыканию, реверс напряжения на емкостном накопителе достигает 70%, поэтому зарядное напряжение емкостного накопителя необходимо снизить до 50 кВ.

В блоке выполнена специальная диэлектрическая полость, в которую помещен разрядник. Для коммутации накопителей используется газовый искровой разрядник планарной геометрии. Конструкция разрядника аналогична конструкции разрядника в [4]. В качестве рабочей среды разрядника используется воздух атмосферного давления, рабочее напряжение разрядника не более 55 кВ. В частотном режиме разрядник имеет непрерывную продувку.

Каждый индуктор содержит сердечник, намотанный из ленты электротехнической стали ЭТ-3425. Вольт-секундный интеграл сердечника одного индуктора, соответствующий полному перемагничиванию, составляет около 20 мВ·с. Подмагничивание сердечников осуществляется с помощью дополнительного генератора, обеспечивающего ток подмагничивания ~1 кА. Используется активное подмагничивание, при котором разрядник в трансформаторе срабатывает в тот момент, когда ток подмагничивания достигает своего амплитудного значения.

Габаритные размеры трансформатора с одним индуктором 125×38×20 см<sup>3</sup>.

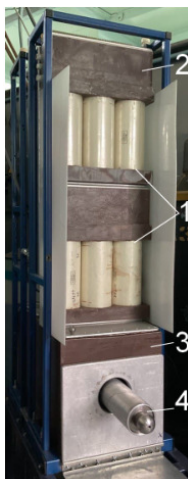


Рис.2. Фотография импульсного трансформатора. 1 – емкостной накопитель энергии, 2 – разрядник, 3 – индуктор, 4 – электрод вторичного витка.

#### 4. Параметры линейного импульсного трансформатора

Электрические параметры трансформатора с  $k = 1$  (Рис.1а), трансформатора с  $k = 2$  (Рис.1б) и последовательного соединения двух трансформаторов с соотношением витков каждого  $k = 2$  (Рис.1в), приведенные ко вторичному витку, сведены в Таблицу 1. Емкость накопителя энергии измерялась измерителем иммитанса. Индуктивность разрядного контура, рассчитывалась по форме осциллограммы тока нагрузки в режиме короткого замыкания ( $R_{\text{load}} = 0$ ).

**Таблица 1.** Параметры разрядного контура: А) трансформатора с  $k = 1$ , Б) трансформатора с  $k = 2$ , В) двух последовательно соединенных трансформаторов с  $k = 2$  каждый.  $C_c$ ,  $L_c$  – емкость и индуктивность, приведенные к вторичному витку,  $T/2$  – время полупериода тока нагрузки при в режиме короткого замыкания,  $\rho = (L_c/C_c)^{1/2}$  – импеданс разрядной цепи

	$C_c$ , нФ	$L_c$ , нГн	$T/2$ , нс	$\rho$ , Ом
А	157.3	465	850	1.7
В	39.5	1248	660	5.6
С	19.75	2826	740	12.0

Характеристики выходных импульсов трансформаторов исследованы с помощью резистивной нагрузки. Режим разряда варьировался так, чтобы обеспечить как малый, так и большой коэффициент затухания сигнала. Примеры осциллограмм разряда трансформатора на «согласованную» нагрузку ( $R_{\text{load}} \sim \rho$ ) показаны на Рис.3 при  $U_0 = 50$  кВ. Около 60% накопленной энергии передается в нагрузку за характерное время порядка 1 мкс. При этом отсутствует насыщение сердечников индукторов.

Амплитуды напряжения нагрузки и тока нагрузки можно варьировать выбором схемы трансформатора в зависимости от требований нагрузки. Трансформатор с одним индуктором и  $k = 1$  имеет относительно небольшой импеданс разрядной цепи  $\rho \sim 1.7$  Ом. При «согласованной» нагрузке амплитуда тока нагрузки превышает 17 кА, а напряжение на нагрузке составляет половину от зарядного напряжения ( $0.5 \cdot U_0$ ). Пиковая мощность нагрузки в этом режиме составляет 0.45 ГВт. При наличии в трансформаторе двух индукторов ( $k = 2$ ) импеданс разрядной цепи увеличился до 5.6 Ом. Амплитуда напряжения при «согласованной» нагрузке увеличилась в 2 раза до  $\sim U_0$ , а амплитуда тока уменьшилась в  $\sim 2$  раза до 9 кА. Пиковая выходная мощность при этом осталась неизменной. Последовательное соединение

двух трансформаторов с  $k = 2$  на общий вторичный виток позволило увеличить выходное напряжение на «согласованной» нагрузке до  $\sim 2 \cdot U_0$  при сохранении разрядного тока.

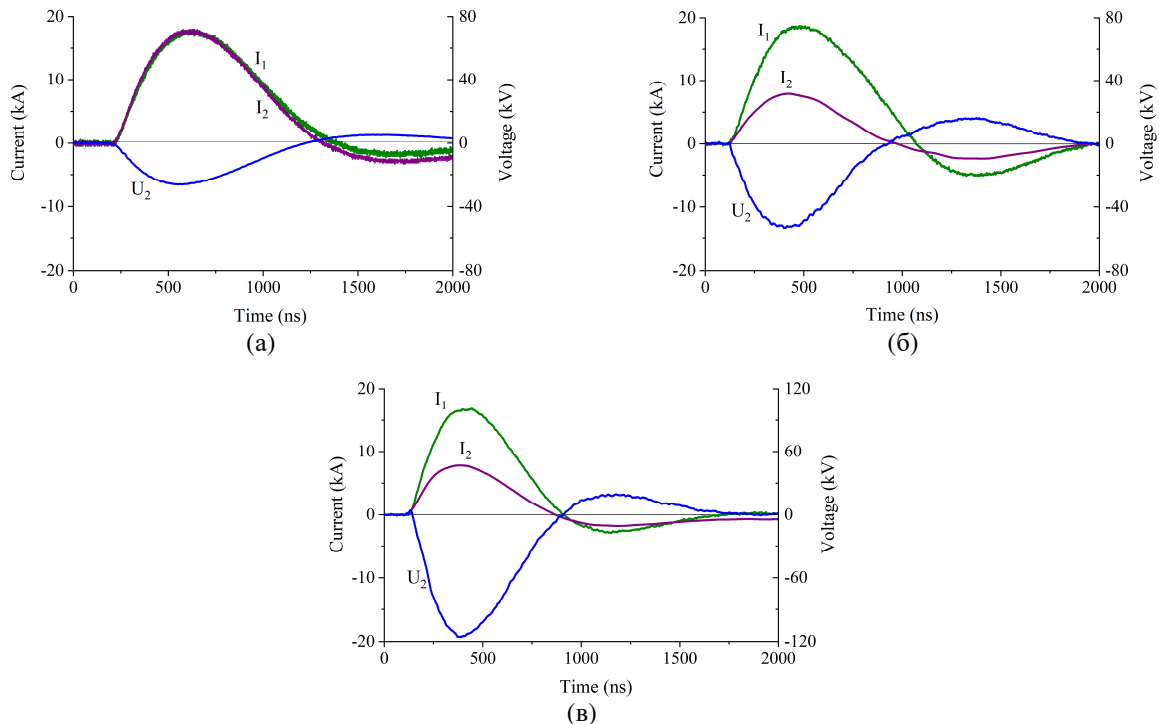


Рис.3. Осциллограммы разряда: а) трансформатора с коэффициентом трансформации  $k = 1$  при сопротивлении нагрузки  $R_{\text{load}} = 1.8$  Ом; б) трансформатора с  $k = 2$  при  $R_{\text{load}} = 5.0$  Ом; в) двух трансформаторов с  $k = 2$  при  $R_{\text{load}} = 11.3$  Ом.  $I_1$  – ток в первичном витке,  $I_2$  – ток во вторичном витке,  $U_2$  – напряжение на нагрузке. Зарядное напряжение  $U_0 = 50$  кВ.

## 5. Частотный режим работы

В частотном режиме работы испытано два варианта трансформаторов при зарядном напряжении  $U_0 = 50$  кВ и частоте повторения импульсов до 5 Гц: один трансформатор с  $k = 2$  на резистивной нагрузке 5.9 Ом и два последовательно соединенных трансформатора (также с  $k = 2$ ) при нагрузке 8.7 Ом. Всего было произведено более 30000 выстрелов на один трансформатор и более 5000 на последовательное соединение двух трансформаторов. Джиттер составил  $\sim 20$  нс для одного трансформатора и  $\sim 10$  нс для двух трансформаторов. Среднеквадратичное отклонение выходной мощности для обоих вариантов не превысило 5%. Результаты свидетельствуют об успешной работе трансформаторов на частоте до 5 Гц.

## 6. Выводы

Созданы и испытаны линейные импульсные трансформаторы с воздушной изоляцией атмосферного давления. Трансформаторы позволяют передать около 60% запасенной энергии на «согласованную» нагрузку с характерным временем около 1 мкс. Амплитуда тока нагрузки трансформатора с  $k = 1$  превышает 17 кА, а напряжение нагрузки составляет  $\sim 0.5 \cdot U_0$  при «согласованной» нагрузке. Амплитуда напряжения трансформатора с  $k = 2$  увеличилась в 2 раза до  $\sim U_0$ , а амплитуда тока уменьшилась в 2 раза на «согласованной» нагрузке. В обоих случаях выходная мощность составила  $\sim 0.45$  ГВт при зарядном напряжении 50 кВ. Последовательное соединение нескольких трансформаторов позволяет повысить напряжения нагрузки при сохранении величины тока нагрузки. Трансформаторы работали на частотах до 5 Гц без существенных изменений выходных параметров импульса. Результаты этих

испытаний позволяют рекомендовать эти линейные импульсные трансформаторы для широкой области применения благодаря их масштабируемости и низкому внутреннему сопротивлению.

### **Благодарности**

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема № FWRM-2021-0001.

### **7. Литература**

- [1] Luchinskii A.V., Ratakhin N.A., Fedushchak V.F., Shepelev A.N., *Russ. Phys. J.*, **38**(12), 1246, 1995; doi: 10.1007/BF00559385
- [2] Luchinskii A.V., Ratakhin N.A., Fedushchak V.F., Shepelev A.N., *Russ. Phys. J.*, **40**(12), 1178, 1997; doi: 10.1007/BF02524306
- [3] Elcod K75-74 [online], <http://www.elcod.spb.ru/catalog/k75-74.pdf>
- [4] Kovalchuk B.M., Kharlov A.V., Kumpyak E.V., Smorudov G.V., Zherlitsyn A.A., *Rev. Sci. Instrum.*, **85**(1), 013501, 2014; doi: 10.1063/1.4857475