

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ С НИЗКОЙ ИНДУКТИВНОСТЬЮ РАССЕЯНИЯ

Створені оригінальні високовольтні імпульсні трансформатори з низькою індуктивністю розсіювання, які використовуються в різноманітних генераторах високовольтних імпульсів, у тому числі для технологічних установок, що призначені для обробки різних матеріалів і продуктів харчування, отримання озону, очищення рідких і газоподібних відходів.

Созданы оригинальные высоковольтные импульсные трансформаторы с низкой индуктивностью рассеивания, которые используются в различных генераторах высоковольтных импульсов, в том числе для технологических установок, предназначенных для обработки разных материалов и продуктов питания, получения озона, очистки жидких и газообразных отходов.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие технологий с использованием сильных электрических полей для обработки материалов и продуктов питания, получения озона, очистки жидких и газовых отходов, в медицине и сельском хозяйстве требует создания новых высоковольтных импульсных источников энергии [1, 2]. Широкое применение в таких источниках находят импульсные трансформаторы. Использование высоковольтных импульсных трансформаторов часто является более предпочтительным по сравнению с другими схемами умножения напряжений. Например, недостатком генератора импульсных напряжений по схеме Аркадьева-Маркса является большое количество разрядников, что делает систему недолговечной и малопривлекательной для работы в импульсно-периодическом режиме [3].

Для обеспечения быстрой коммутации выходных высоковольтных разрядников необходимо перенапряжение для формирования выходного напряжения с большой крутизной фронта. Отсюда следует, что высоковольтный импульсный трансформатор должен быть достаточно компактным с целью получения минимального рассеивания магнитного потока и, следовательно, минимизации времени нарастания на его выходе.

Целью работы является создание трансформаторного импульсного мегавольтного генератора с временем t_{Φ} нарастания импульсов на емкостной нагрузке ≈ 1 нФ $t_{\Phi} \approx 250$ нс.

В схемах генераторов мегавольтного уровня напряжений с короткими временами нарастания напряжения на емкостной нагрузке трудно изготовить один импульсный трансформатор с коэффициентом трансформации ≈ 100 и низкой индуктивностью рассеивания. В таких схемах лучше использовать несколько (например, два) импульсных трансформаторов каждый с коэффициентом трансформации ≈ 10 , что иллюстрирует рис. 1. В такой схеме первичный накопитель энергии C_0 разряжается через коммутатор P_0 на низковольтную первичную обмотку первого импульсного трансформатора ИТ1. Первый импульсный трансформатор ИТ1 заряжает промежуточный емкостной накопитель C_1 , который затем разряжается через коммутатор P_1 на низковольтную первичную обмотку второго импульсного трансформатора ИТ2 с низкой индуктивностью рассеивания для более быстрой зарядки высоковольтной формирующей выходной емкости C_2 генератора. После достижения напряжения

на C_2 требуемой величины происходит разряд емкости C_2 через сработавший выходной коммутатор P_2 .

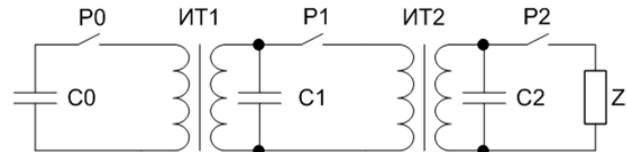


Рис. 1. Схема генератора

КОНСТРУКЦИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Для получения мегавольтного уровня напряжения на выходе генератора по схеме на рис. 1 были спроектированы и изготовлены два импульсных трансформатора имеющие одинаковый коэффициент трансформации $n = w_2/w_1 = 10,3$. Число витков в первичной обмотке каждого трансформатора $w_1 = 3$, а во вторичной обмотке $w_2 = 31$. Напряжение первичной обмотки 10 и 100 кВ, а вторичной 100 и 1000 кВ соответственно. Методика расчета импульсных трансформаторов описана в [4, 5].

Для изготовления магнитопровода (сердечника) импульсных трансформаторов была использована электротехническая сталь толщиной 80 мкм и шириной ленты 40 мм. Составной сердечник выполнен из 8 сердечников малого размера с внутренним окном 125×125 мм и сечением 35×40 мм². Каждый сердечник малого сечения соединен с другими сердечниками как показано на рис. 2. В результате этого образуется один составной "крестообразный" сердечник с габаритными размерами 430×430 мм.

Для снижения напряженности электрического поля на острых краях сердечника последние закрыты градиентными экранами с закруглениями. Экран изготовлен из латуни толщиной 1 мм.

Первичные обмотки импульсных трансформаторов намотаны на стержнях крестообразного магнитопровода (см. рис. 2). Витки обмоток изготовлены из медной ленты толщиной 0,3 мм и шириной 27 мм. Края ленты для экранирования неровностей края обернуты алюминиевой фольгой толщиной 10 мкм. Шина изолирована 6 слоями фторопластовой пленки толщиной $\delta = 20$ мкм. Для уменьшения индуктивности подвода расстояние между вводами обмотки сделано минимальным. Для этого между витками первичной обмотки и низковольтным вводом, проложенным под обмоткой, уложено 10 слоев фторопластовой

пленки. Вторичные обмотки намотаны в один слой на изоляторах из оргстекла, которые уложены на первичную обмотку, проводом МПО-33-11 в фторопластовой изоляции. Вторичная обмотка импульсного трансформатора ИТ2 намотана на изоляторах в виде пирамиды. Для снижения напряженности поля на высоковольтном конце обмотки последний виток выполнен проводом большего диаметра, а вывод обмотки помещен в изоляционную фторопластовую трубку. Для того чтобы магнитный поток от каждого стержня был направлен в одну сторону, обмотки намотывались попарно встречно, т.е. обмотки на одной оси намотаны встречно (см. рис. 2).

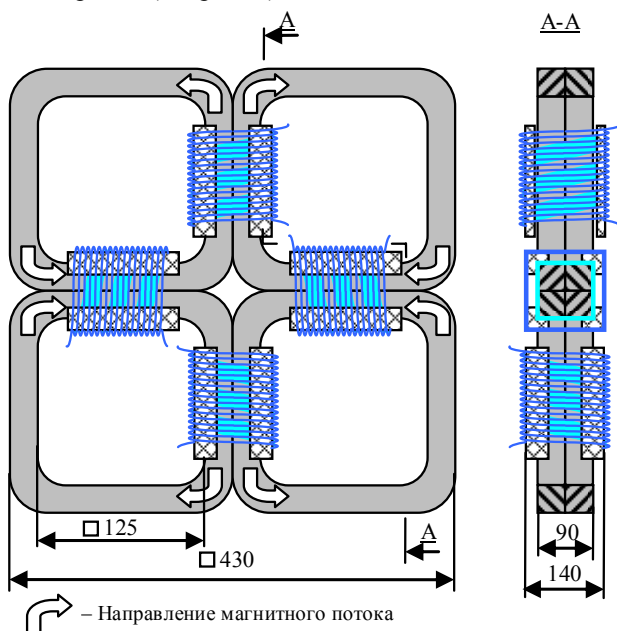


Рис. 2. Импульсный трансформатор ИТ1

Высокое напряжение, прикладываемое к обмоткам импульсного трансформатора, воздействует на изоляцию, разделяющую обмотки между собой и каждую обмотку относительно сердечника. В качестве основной изоляции в трансформаторе используется трансформаторное масло.

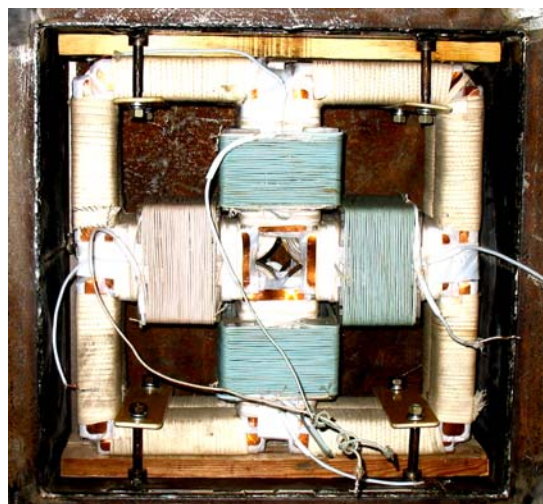
Трансформатор закреплен в металлическом корпусе. На рис. 3 приведены фотографии импульсных трансформаторов ИТ1 (рис. 3,а) и ИТ2 (рис. 3,б), закрепленных в корпусе, но не залитых трансформаторным маслом.

Индуктивность рассеивания импульсного трансформатора с сердечником, несущим на одном стержне две обмотки в виде однослойных соленоидов высотой h , приведенная ко вторичной обмотке рассчитывается при помощи соотношения [4]:

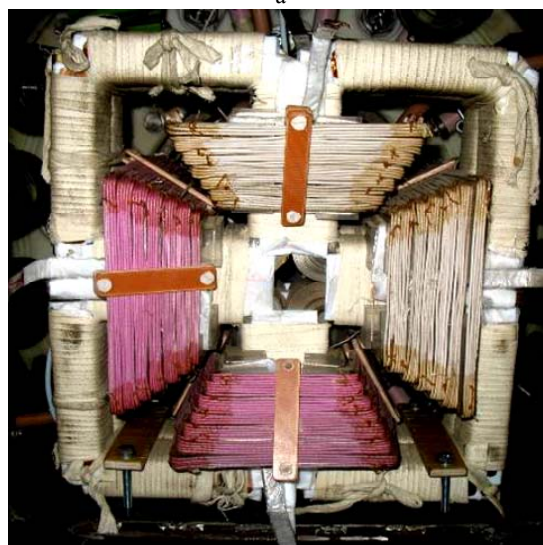
$$L_s = \mu_0 w_2^2 g [d + (D_1 + D_2)/3]/h,$$

где $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м, w_2 – число витков вторичной обмотки, g – периметр вторичной обмотки, D_1, D_2 – диаметры проводов первичной и вторичной обмоток, d – расстояние между обмотками.

Рассчитанная индуктивность рассеивания импульсного трансформатора, приведенная ко вторичной обмотке, составила $4,75 \times 10^{-5}$ Гн.



а



б

Рис. 3. Фотографии импульсных трансформаторов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ СХЕМА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для проведения экспериментальных исследований импульсного трансформатора на низком напряжении была собрана экспериментальная схема, показанная на рис. 4.

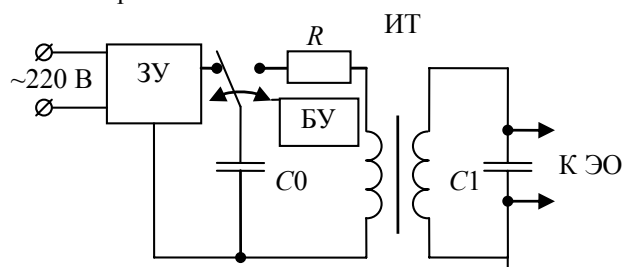


Рис. 4. Схема для исследований импульсного трансформатора: ЗУ – зарядное устройство, БУ – блок управления, C_0, C_1 – накопительная и нагрузочная емкости соответственно, R – сопротивление контура, ИТ – исследуемый импульсный трансформатор

От зарядного устройства ЗУ, подключаемого к сети переменного тока ~ 220 В, накопительная емкость заряжалась до напряжения 300 В. После этого блок управления переключал накопительный конденсатор

$C0$ от зарядной цепи к первичному контуру испытуемого импульсного трансформатора ИТ. Накопительный конденсатор $C0$ разряжался на исследуемый импульсный трансформатор ИТ через который заряжался накопительный конденсатор $C1$.

Эквивалентная схема разряда накопительного конденсатора через импульсный трансформатор на нагрузочную емкость (без учета индуктивности намагничивания трансформатора) приведена на рис. 5.

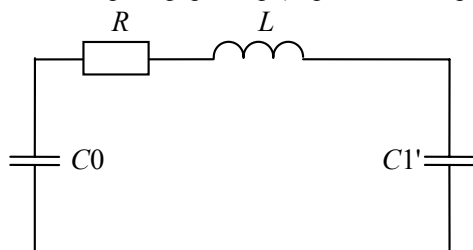


Рис. 5. Эквивалентная схема разрядного контура:

R – эквивалентное сопротивление разрядного контура,
 L – эквивалентная индуктивность разрядного контура,
 $C0$ – накопительная емкость, $C1'$ – приведенная нагрузочная емкость

Если заряженный конденсатор разряжать на цепь, состоящую из сопротивления и индуктивности, то разряд может происходить или аperiodически, т. е. напряжение конденсатора непрерывно спадает до нуля, или же при разряде получаются колебания, т. е. конденсатор разряжается до нуля, затем начинает заряжаться в противоположном направлении, потом опять разряжается, заряжается и т.д.

При параметрах схемы удовлетворяющих соотношению $1/LC > r^2 / 4L^2$, где C – эквивалентная емкость разрядного контура, $C = (C0 \cdot C1') / (C0 + C1')$, напряжение конденсатора совершает периодические колебания со все уменьшающейся амплитудой около своего конечного значения. В случае разряда $C0$ на цепь $R-L-C1'$, где $C1'$ – приведенная нагрузочная емкость, от величины нагрузочной емкости зависит величина максимального напряжения, до которого нагрузочная емкость $C1'$ может зарядиться.

При значении накопительной емкости $C0 = 0,2$ мкФ и при значениях нагрузочной емкости $C1 = (0,01; 1,18; 1,56; 2,35; 4,7)$ нФ были получены величины максимального напряжения на нагрузочной емкости $C1$ и построен график этой зависимости, показанный на рис. 6.

Предварительные испытания импульсного трансформатора ИТ2 проводились на низком напряжении при коммутации накопительной емкости в первичной обмотке трансформатора, равной 0,2 мкФ, и нагрузочной емкости во вторичной обмотке, равной 1,56 нФ. Период колебаний напряжения на нагрузочной емкости составил 1,23 мкс. Индуктивность L_3 всего разрядного контура рассчитывалась по формуле

$$L_3 = T^2 / 4\pi^2 C, \quad (1)$$

где T – период колебаний, C – эквивалентная емкость разрядного контура ($4,37 \times 10^{-5}$ Гн).

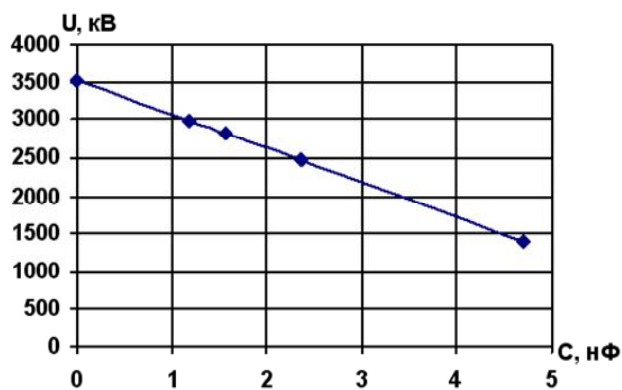


Рис. 6. Зависимость максимального напряжения на нагрузочной емкости от ее величины

На предварительных испытаниях выяснено влияние числа обмоток импульсного трансформатора на период колебаний передаваемого импульса. На рис. 8 приведены осциллограммы импульса напряжения на емкости равной 20 нФ во вторичной обмотке трансформатора при емкости в первичной обмотке трансформатора равной 2 мкФ. Из полученных осциллограмм видно, что при подключении всех четырех обмоток (рис. 7,а) период колебаний составил 4 мкс, при подключении двух обмоток (рис. 7,б) период составил 5 мкс, а при подключении одной обмотки (рис. 7,в) период составил 7 мкс. Рассчитанный период колебаний передаваемого импульса из (1) составил: для четырех обмоток – 4,33 мкс, для двух обмоток – 6,12 мкс и для одной обмотки – 8,66 мкс.

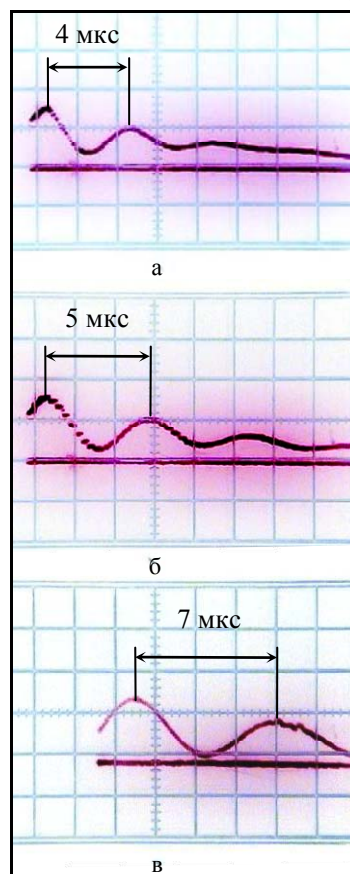


Рис. 7. Осциллограммы импульсов напряжения на вторичной обмотке импульсного трансформатора ИТ2 (цена деления 2 мкс)

При работе импульсного трансформатора ИТ1 в составе установки по генерированию импульсов высокого напряжения, после заряда емкостного накопителя и его разряда через управляемый разрядник P0, на первичную обмотку подавался импульс напряжения амплитудой 8,6 кВ. К вторичной обмотке была подключена промежуточная накопительная емкость ~150 нФ, которая заряжалась до напряжения ≈80 кВ за время ≈3,2 мкс. Дальнейший рост напряжения на емкости ограничивался срабатыванием разрядника P1.

На рис. 8 приведены осциллограммы импульсов напряжения на первичной (рис. 8,а) и вторичной (рис. 8,б) обмотке импульсного трансформатора ИТ1. Высокочастотные колебания большой амплитуды на осциллограммах соответствуют моменту срабатывания управляемого разрядника P1 и обусловлены наносекундным временем его коммутации. После срабатывания разрядника P1 импульсное напряжение подавалось на первичную обмотку ИТ2. При этом на вторичной обмотке ИТ2, нагруженной на C2, создавалось импульсное напряжение с амплитудой до 800 кВ. После срабатывания разрядника P2 это импульсное напряжение с обостренным фронтом подавалось на нагрузку Z. При напряжении срабатывания P1 100кВ на C2 можно получить напряжение 1 МВ и более.

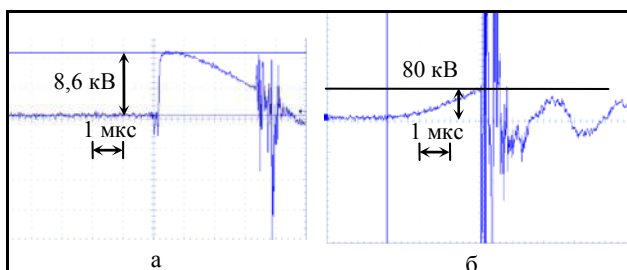


Рис. 8. Осциллограммы импульсов напряжения на обмотках импульсного трансформатора ИТ1 при работе в составе установки по генерированию импульсов напряжения

ВЫВОДЫ

1. Созданы высоковольтные импульсные трансформаторы (на 100 и 1000 кВ) с низкой индуктивностью рассеивания для импульсного мегавольтного генератора.

2. Оригинальность конструкции созданных трансформаторов, состоящая в том, что части как вторичной, так и первичной обмоток разнесены и расположены не на одном общем стержне, а на четырех крестообразно расположенных частях расщепленного стержня магнитопровода, что позволило уменьшить результирующую индуктивность рассеивания. При работе в составе установки с параллельно включенными четырьмя обмотками каждого из двух импульсных трансформаторов индуктивность разрядного контура уменьшилась в ≈3 раза.

3. Использование двух импульсных трансформаторов с коэффициентами трансформации $n = 10$ у каждого позволило создать компактный трансформаторный импульсный мегавольтный генератор с временем t_{ϕ} нарастания импульсов на емкостной нагрузке ≈1 нФ $t_{\phi} \approx 250$ нс и напряжением до 1 МВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бойко Н.И., Борцов А.В., Евдошенко Л.С., Зароченцев А.И., Иванов В.М. Электрофизические установки и технологии для решения проблемы отходов / Мир техники и технологий. – №3 (52). – 2006. – С. 63-65.
2. Бойко Н.И., Борцов А.В., Евдошенко Л.С., Зароченцев А.И., Иванов В.М. Метод обеззараживающей обработки текучих продуктов в потоке при помощи сильных импульсных электрических полей и искровых разрядов / Техническая электродинамика, тематический выпуск "Проблемы современной электротехники" (часть 4). – 2006. – С. 83-86.
3. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника / Г.А. Месяц. – М.: Наука, 2004. – 704 с.
4. Матханов П.Н., Гоголицын Л.З. Расчет импульсных трансформаторов. Л.: Энергия. Ленинградское отделение, 1980. – 112 с.
5. Желтов К.А. Пикосекундные сильноточные электронные ускорители. М.: Энергоатомиздат, 1991. – 120 с.

Поступила 19.07.2010

Иванов Владимир Михайлович

Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт "Молния" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" 61100, Украина, Харьков, ул. Шевченко, 47 тел./факс: (057)70-76-183, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

V.M. Ivanov

High-voltage pulsed transformers with low leakage inductance.

Original high-voltage pulsed transformers with low leakage inductance which are used in various generators of high-voltage pulses including technological plants intended for treatment of different materials and foodstuffs, ozone production, cleaning of liquid and gaseous wastes, have been created.

Key words – high-voltage pulsed transformers, low leakage inductance, application.