

# ИМПУЛЬСНЫЙ МОДУЛЯТОР ДЛЯ ПИТАНИЯ МОЩНОЙ МАГНЕТРОННОЙ ПУШКИ С ВТОРИЧНО-ЭМИССИОННЫМ КАТОДОМ

*А.Н. Довбня, В.В. Закутин, Н.Г. Решетняк, В.П. Ромасько, И.А. Чертищев*  
*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
 Харьков, Украина*

Проведены исследования по формированию высоковольтных импульсов для питания мощной магнетронной пушки. Использование LC-контура для прекращения разрядного тока через тиратрон позволяет перейти от режима полного разряда накопительного элемента к режиму частичного разряда. Это повышает эффективность модулятора.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы проводятся исследования формирования и параметров электронного пучка с вторично-эмиссионных источников в скрещенных полях [1]. На основе магнетронной пушки с вторично-эмиссионным катодом создан макет ускорителя с энергией частиц 100 кэВ и током пучка 110 А [2]. Принцип действия пушки основан на вторично-эмиссионном размножении электронов, образовании электронного облака и формировании электронного пучка в скрещенных полях. Такие пушки просты в конструкции, не теряют эмиссию после напуска атмосферы, имеют большой срок службы, имеют хорошую стабильность амплитуды, азимутальную однородность [3].

Спецификой использования магнетронной пушки является необходимость создания импульса напряжения, который должен иметь выброс в начальной части для возбуждения процесса вторично-эмиссионного размножения электронов и плоскую часть для генерации мощного электронного пучка. При этом в начальной части импульса электронного пучка нет, и импульсный генератор работает в режиме холостого хода. Необходимость получения длинных импульсов напряжения (15...30 мкс) требует большой индуктивности намагничивания импульсного трансформатора, что приводит к увеличению сечения сердечника импульсного трансформатора (ИТ) и его веса. С целью сокращения объема сердечника ИТ и упрощения его конструкции предложено увеличивать длительность импульса напряжения путем перехода в нелинейную область насыщения материала сердечника ИТ [4]. Однако в нелинейной области ток через тиратрон резко возрастает за счет уменьшения индуктивности намагничивания ИТ. С целью обрыва тока через тиратрон необходимо использовать запирающий LC-контур.

В настоящей работе приведены результаты расчетов и экспериментов по формированию импульса напряжения при использовании запирающего колебательного LC-контура в модуляторе для питания мощной магнетронной пушки ускорителя электронов.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперименты по формированию импульсов проводились на установке, содержащей импульсный генератор, нагруженный на магнетронную пушку с

вторично-эмиссионным катодом. Схема установки приведена на Рис.1.

Накопительным элементом в импульсном генераторе 1 является конденсатор  $C_n$  емкостью 1,6 мкф. Конденсатор заряжается от источника питания  $U_0$  через зарядный дроссель  $L_1$ . Разряд накопительной емкости осуществляется через импульсный трансформатор  $PT$  с коэффициентом трансформации  $n = 5$  и тиратрон  $T_1$  на балластное сопротивление  $R_1 = 4,2$  кОм. Балластный резистор состоит из 12 сопротивлений ТВО-60 с суммарной рассеиваемой мощностью 720 Вт. При разряде накопительного конденсатора на вторичной обмотке импульсного трансформатора формируется импульс напряжения.

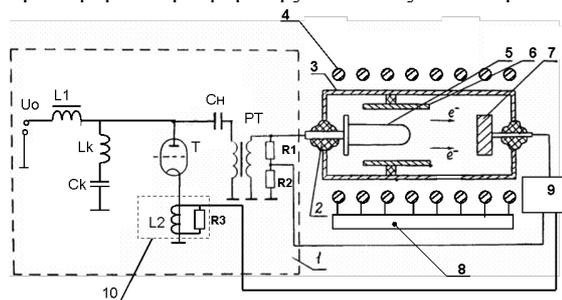


Рис.1. Схема установки

Импульсные трансформаторы [5] рассчитываются на заданную длительность импульса при заданной амплитуде напряжения. Превышение этих величин неизбежно приведет к тому, что импульсный трансформатор будет работать в нелинейном режиме.

Магнитная проницаемость сердечника значительно уменьшается при выходе рабочей точки трансформатора в нелинейную часть петли гистерезиса. При этом уменьшается индуктивность намагничивания трансформатора, что приводит к нарастанию тока через тиратрон и возникновению области максимума тока и его спада по мере разряда конденсатора.

Для того чтобы предотвратить полный разряд накопительного конденсатора и избежать появления максимума тока, превышающего предельно допустимый для данного типа тиратрона, необходимо запирающий тиратрон путём приложения к аноду напряжения противоположной полярности с током большим тока через тиратрон в заданный момент времени. Это можно осуществить путем использования запирающего колебательного LC-контура, включенного параллельно тиратрону. При заряде накопительного конденсатора емкость контура  $C_k$

будет заряжаться до той же величины. При срабатывании тиратрона через него будет протекать ток накопительного конденсатора, состоящий из тока намагничивания, тока нагрузки и тока потерь, а также ток запирающего контура. При колебательном перезаряде емкости  $C_k$  ток запирающего контура изменит свое направление, а при достижении амплитуды, равной току накопительного конденсатора в заданный момент времени, тиратрон будет запирается.

Исследования проводились с магнетронной пушкой коаксиальной геометрии с диаметром катода (5) 40 мм и анода (6) 70 мм, которая размещалась в вакуумном объеме (3). Импульс напряжения подается на катод пушки. Магнитное поле для генерации пучка создается соленоидом (4), который питается от источника тока (8).

В процессе исследований проводились измерения амплитудных и временных характеристик импульсов напряжения на катоде магнетронной пушки и тока пучка на цилиндре Фарадея (7). Сигналы через омические делители поступали на компьютерную измерительную систему (9) для дальнейшей обработки в цифровом виде. Компьютерная измерительная система позволяет обрабатывать импульсы от 1 до 32, определять их амплитуду, длительность, стабильность по амплитуде. Полученные данные выводятся на экран компьютера, погрешность измерений составляет ~2%.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Были проведены расчёты и эксперименты по формированию высоковольтного импульса напряжения, измерялась амплитуда и длительность импульса напряжения на вторичной обмотке трансформатора, ток через тиратрон и ток пучка.

Проведены расчеты формы импульсов тока и напряжения в модуляторе. Расчёты проводились по методике и программе, описанной в [6], отличающейся использованием двух ключей: первый – включает разряд, а второй выключает разряд накопительного конденсатора и запирающего контура в момент, когда суммарный ток через первый ключ равен нулю.

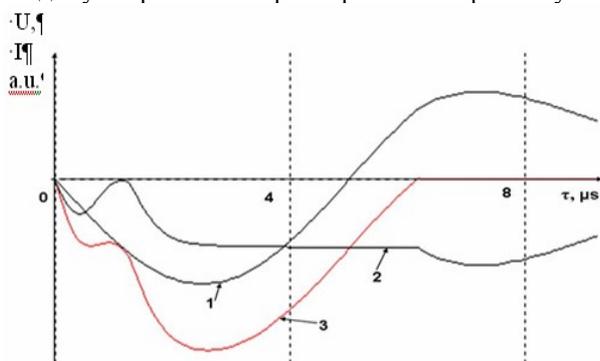


Рис.2. Расчетные импульсы тока колебательного контура (1), разрядного тока накопительного конденсатора (2), суммарного тока через тиратрон (3); параметры запирающего колебательного контура  $Lk = 32 \text{ мкГн}$ , и  $Ck = 80 \text{ нФ}$

На Рис.2 приведены импульсы тока разряда накопительного конденсатора, тока колебательного

контура, а также импульс суммарного тока через тиратрон, иллюстрирующие принцип работы запирающего колебательного контура.

Из рисунка видно, что после момента равенства амплитуд токов 1 и 2 (при котором происходит запираение тиратрона) возникает выброс разрядного тока. Этот выброс связан с рассеянием в нагрузке энергии, запасённой в паразитных параметрах импульсного трансформатора.

Проведенные расчёты показали, что при увеличении тока нагрузки (в нашем случае это ток пучка, который может регулироваться изменением магнитного поля) амплитуда выброса напряжения на нагрузке уменьшается. Кроме того, при увеличении тока нагрузки равенство токов накопительного конденсатора и колебательного контура наступает позже. На Рис.3 приведена расчетная зависимость амплитуды выброса на импульсе напряжения и времени, при котором наблюдается равенство токов, от амплитуды тока нагрузки при напряжении на выходе модулятора 40 кВ и добротности запирающего контура равной 10.

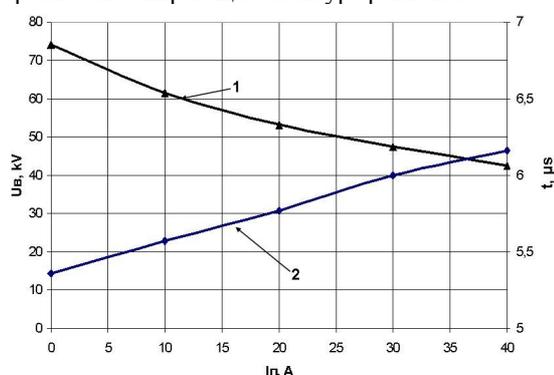


Рис.3. Расчетная зависимость амплитуды выброса на спаде импульса напряжения (1) и времени, при котором наблюдается равенство токов, от амплитуды тока нагрузки (2)

Данные, приведенные на этом рисунке, позволяют определить амплитуду выброса и время достижения равенства токов при различных значениях тока нагрузки, т.е. тока пучка. Например, при отсутствии тока пучка амплитуда выброса составит 73 кВ, и время достижения равенства токов, что эквивалентно длительности импульса, составит 5,3 мкс, в то время как при токе пучка 40 А амплитуда выброса составит 42 кВ и время достижения равенства токов (длительность импульса) составит 6,2 мкс.

Проведены эксперименты по формированию мощных высоковольтных импульсов с использованием запирающего контура. На Рис.4 показаны осциллограммы импульсов напряжения, тока пучка и тока через тиратрон с пучком и без пучка при отключенном запирающем контуре. Из рисунка видно, что за счёт насыщения сердечника ИТ-импульс напряжения имеет достаточно резкий спад, а ток через тиратрон имеет область максимума, при этом наличие пучка приводит к уменьшению максимального тока.

На Рис.5 приведены осциллограммы импульсов напряжения, тока пучка и тока через тиратрон с пучком и без пучка при подключенном запирающем контуре.

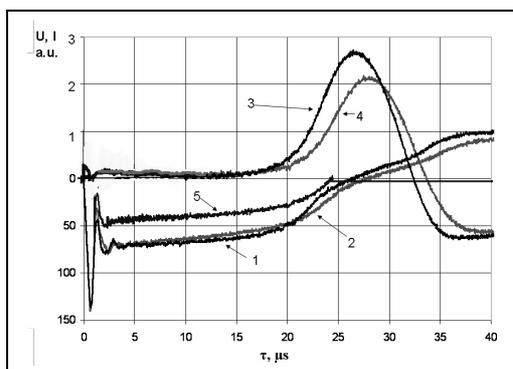


Рис. 4.

Осциллограммы импульсов напряжения (1 - без пучка, 2 - с пучком), тока через тиратрон (3 - без пучка, 4 - с пучком) и тока пучка (5) без запирающего контура

Из рисунка видно, что ток через тиратрон уменьшается до нуля, в этот момент тиратрон запирается и на импульсе напряжения появляется выброс и изменяется полярность напряжения, что обусловлено выделением энергии, запасённой в паразитных элементах схемы. При этом длительность импульса тока пучка увеличивается также за счёт этой энергии. Таким образом, в экспериментах реализован режим запираания тиратрона, что даёт возможность управления процессом формирования мощных импульсов напряжения, в том числе и переходом в режим частичного разряда накопительной ёмкости.

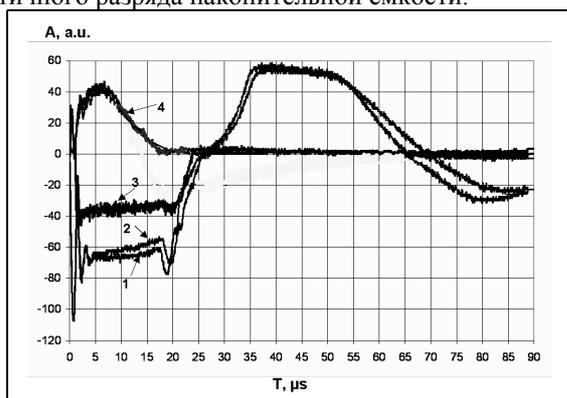


Рис. 5. Осциллограммы импульсов напряжения (1 - холостой ход, 2 - с пучком), тока пучка (3) и тока через тиратрон (4)

Проведены эксперименты при использовании в качестве накопительного элемента формирующей линии, которые также показали возможность запираания тиратрона с помощью запирающего контура.

#### PULSE MODULATOR FOR FEEDING POWER MAGNETRON GUN WITH SECONDARY-EMISSION CATHODE

*A.N. Dovbnya, V.V. Zakutin, N.G. Reshetnyak, V.P. Romas'ko, I.A. Chertishchev*

The investigation of forming high voltage pulses for feeding power magnetron gun was made. Use of LC-circuit stop the discharge current across thyatron and give ability step over from full discharge accumulation element to partial discharge. Efficiency of modulator will be above.

#### ІМПУЛЬСНИЙ МОДУЛЯТОР ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ ПОТУЖНОЇ МАГНЕТРОННОЇ ГАРМАТИ З ВТОРИННО-ЕМІСІЙНИМ КАТОДОМ

*A.M. Dovbnya, V.V. Zakutin, M.G. Reshetnyak, V.P. Romas'ko, I.A. Chertishchev*

Проведені дослідження по формуванню високовольтних імпульсів для живлення потужної магнетронної гармати. Використання LC-контур припиняє розрядний струм через тиратрон та дозволяє перейти від режиму повного розряду накопичувального елемента до режиму частинного розряду. Ефективність модулятора зростає.

Таким образом, проведенные исследования подтвердили возможность запираания тиратрона при формировании мощных импульсов напряжения при напряжениях 30...40 кВ.

#### ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали возможность формирования высоковольтных импульсов напряжения при использовании запирающего LC-контура для прекращения разрядного тока через тиратрон. Это позволяет перейти от режима полного разряда накопительного элемента к режиму частичного разряда, что повышает коэффициент полезного действия и расширяет возможности использования. После запираания тиратрона генерация пучка будет продолжаться за счет энергии, накопленной в паразитных элементах схемы, что также увеличивает коэффициент полезного действия схемы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А.Н. Довбня, В.В. Закутин, Н.Г. Решетняк и др. Получение мощных электронных пучков в магнетронных пушках с холодными вторично-эмиссионными катодами // *Журнал технической физики*. 2002, т. 72, №12, с.98-102.
2. А.Н. Довбня, В.В. Закутин, Н.Г. Решетняк и др. Исследование формирования пучка в ускорителе электронов с вторично-эмиссионным источником // *Вестник Харьковского Национального университета. Серия Физическая, «Ядра, частицы, поля»* (732). 2006, №2(30), с.96-100.
3. А.Н. Довбня, В.В. Закутин, Н.Г. Решетняк. Исследование азимутальной неоднородности электронного пучка в магнетронной пушке с вторично-эмиссионным катодом // *Вестник Харьковского Национального университета. Серия Физическая, «Ядра, частицы, поля»* (642). 2004, №3(25), с.91-96.
4. В.В. Закутин, Н.Г. Решетняк, В.П. Ромасько, И.А. Чертищев. К вопросу об увеличении длительности импульса напряжения линейного модулятора // *Тезисы докладов XIX Международного семинара по ускорителям заряженных частиц*. 12-18 сентября 2005, Алушта, Крым, с.92.
5. С.С. Вдовин. *Проектирование импульсных трансформаторов*. Ленинград: «Энергия», 1971, с.62-80.
6. И.В. Казарезов, А.А. Корепанов. Согласование параметров формирующих линий и импульсных трансформаторов в схемах импульсных модуляторов для питания мощных клистронов // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»* (35). 1999, №4, с.44-46.

Статья поступила в редакцию 29.10.2007 г.