

Лабораторная работа №1

Ознакомление с работой генератора нейтронов ИНГ-103 на основе камеры плазменного фокуса

Цель работы: Изучение принципа работы генераторов нейтронов на камерах плазменного фокуса (ПФ), определение электротехнических параметров генератора ИНГ-103, определение периода колебаний и амплитуды разрядного тока, определение времени «особенности».

Теоретическая часть

Плазмофокусные установки являются относительно простыми приборами для генерации коротких интенсивных импульсов нейтронов.

В настоящей работе исследуется работа генератора нейтронов на основе камеры плазменного фокуса (ПФ) и емкостного накопителя. Схема включения камеры ПФ с емкостным накопителем электрической энергии с обозначением основных ее частей и отдельных фаз процесса развития сильноточного разряда в камере (сила тока достигает нескольких сотен кА) представлена на рисунке 1.

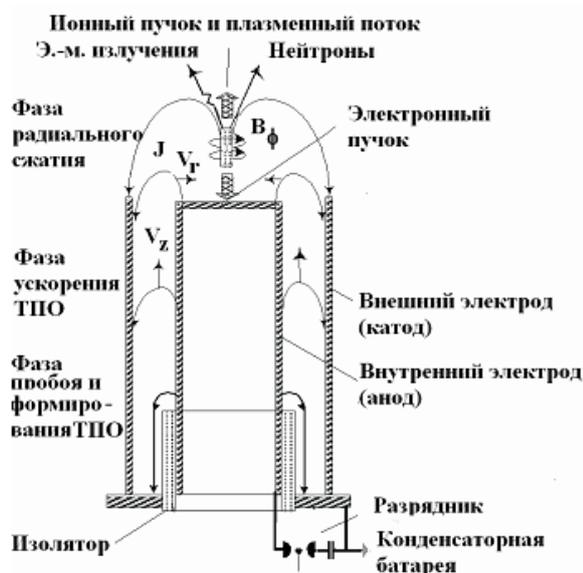


Рисунок 1 – Схема включения камеры ПФ в генераторе нейтронов

При приложении высокого напряжения к электродам камеры происходит электрический пробой вдоль изолятора, при этом формируется токовая плазменная оболочка (ТПО). Под действием собственного магнитного поля разряда ТПО, двигаясь, огибает анод, а затем получает направленное ускорение к центру и сходится вблизи оси камеры. В области кумуляции оболочки на оси происходит формирование нецилиндрического z-пинча, в котором возникает плотное высокотемпературное плазменное образование, получившее название «плазменный фокус» из-за его малой осевой протяженности.

В сильноточном разряде в камере ПФ обычно выделяют фазы:

- фазу пробоя и формирования токовой плазменной оболочки (ТПО);
- фазу ускорения ТПО;
- фазу радиального сжатия плазменного шнура;
- фазу образования плазменного фокуса и формирование ионного пучка, электронного пучка (при торможении которого возникает тормозное излучение с энергией квантов до 250-300 кэВ), а также генерацию нейтронов.

После формирования плазменного фокуса температура в сжатой плазме достигает ~1 кэВ (что соответствует приблизительно 11,6 млн. градусов – порядка температуры ядра Солнца), а плотность частиц достигает $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$. При сжатии плазменного шнура на оси камеры происходит резкое увеличение индуктивности камеры ПФ, что проявляется на осциллограмме разрядного тока в виде «особенности» - уменьшения тока. Этот момент времени называется временем «особенности». В качестве примера на рисунке 2 приведена осциллограмма разрядного тока через камеру ПФ с указанием времени «особенности». Для получения наибольшего выхода нейтронов момент «особенности» должен быть в максимуме тока, то есть, должно обеспечиваться согласование между работой разрядного контура генератора и работой камеры ПФ.

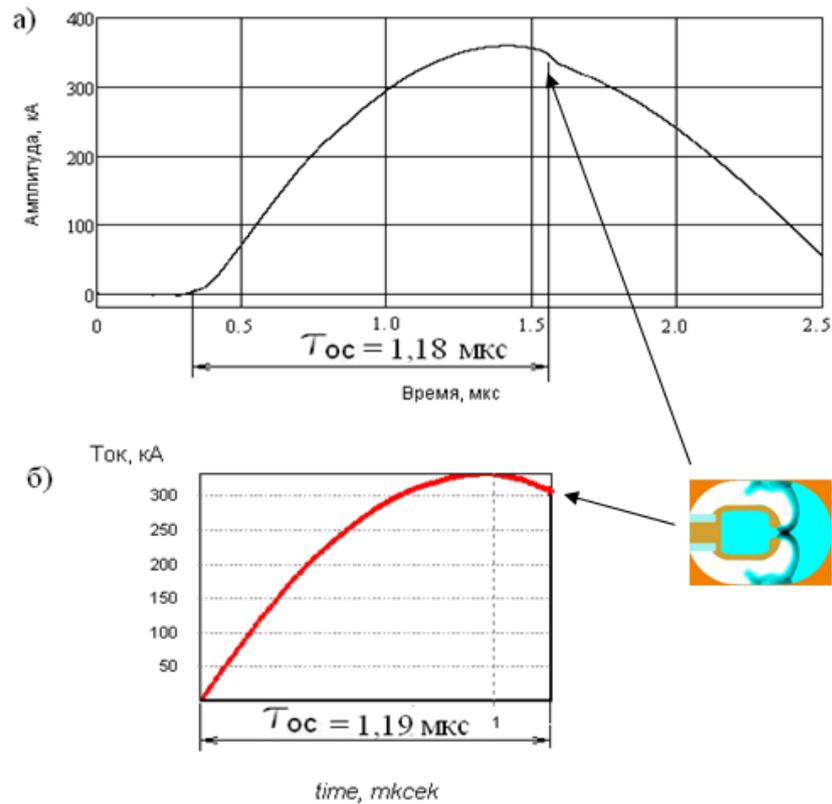


Рисунок 2 – Экспериментальное (а) и расчетное (б) время особенности для камеры ПФ7-02Д (с дейтериевым наполнением)

В плазменном фокусе создаются условия для протекания ядерных реакций синтеза $D(d,n)He^3$, $T(d,n)He^4$ и т.п., сопровождающихся генерацией нейтронов. В зависимости от наполнения камеры ПФ, установка генерирует импульс 2,5 МэВ-ных (дейтериевое наполнение) или 14 МэВ-ных (дейтерий-тритиевое наполнение) нейтронов длительностью 10 – 50 нс (зависит от тока через камеру и выхода нейтронов), интенсивностью до $10^{16} - 10^{19}$ нейтр./с, что на три – четыре порядка превышает интенсивность генерации нейтронов на ускорительных нейтронных трубках. Такой короткий импульс нейтронов удобно использовать при изучении взаимодействия излучения с веществом, для калибровки детекторов нейтронов различного типа и для изучения быстропротекающих процессов.

Необходимо отметить, что наряду с импульсом нейтронов, камера ПФ генерирует импульс электромагнитного излучения широкого спектра энергий, в том числе и жесткого рентгеновского излучения. Для регистрации проникающего излучения используются быстрые сцинтилляционные детекторы. Типичный

импульс проникающего излучения, генерируемого камерой ПФ, представлен на рисунке 3 – наблюдается короткий импульс жесткого рентгеновского излучения (с энергией до 250-300 кэВ) длительностью 3-4 нс и импульс нейтронов длительностью 10-15 нс.

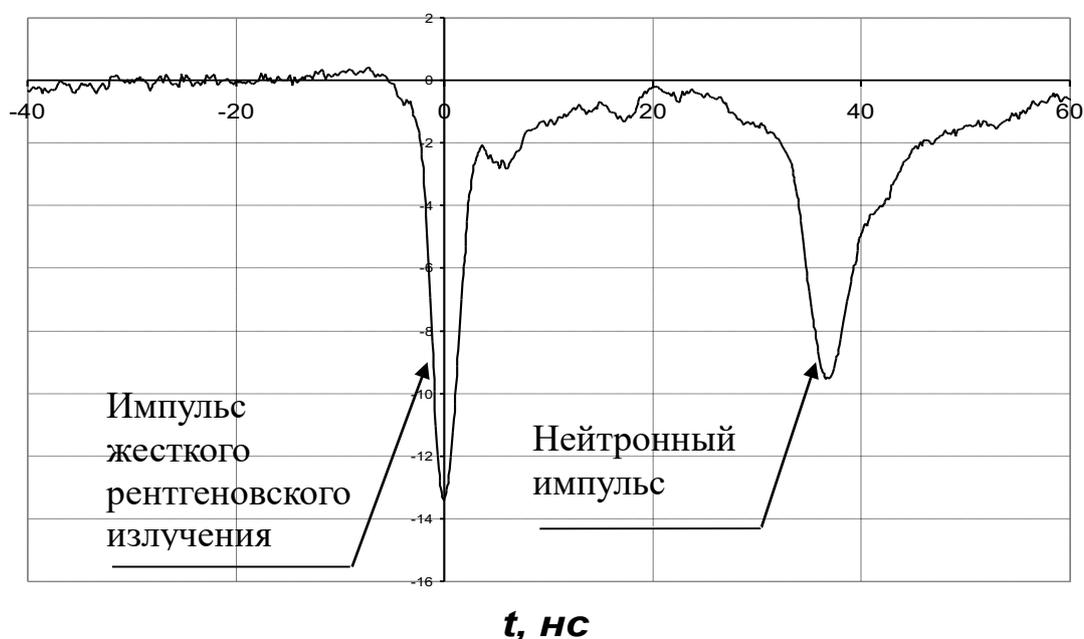


Рисунок 3 – Осциллограмма импульса проникающих излучений камеры ПФ

В работе используется генератор нейтронов ИНГ-103, в котором установлена камера ПФ7-02Д, производства ВНИИА, с дейтериевым наполнением. Камера имеет в своем составе титановый генератор газа, насыщенный дейтерием, и является безопасным прибором в выключенном состоянии, поскольку сделана из меди, которая не активируется под действием нейтронов 2,5 МэВ (порог активации по быстрым нейтронам 9,5 МэВ), т.е. после выключения генератора не радиоактивна. Для питания нагревателя генератора газа камеры ПФ используется отдельный источник питания постоянного тока (ИП). Для защиты ИП от высоковольтной высокочастотной наводки при срабатывании камеры используется СЛС-фильтр нижних частот. Амплитуда разрядного тока через камеру определяется зарядным напряжением емкостного накопителя и электротехническими параметрами разрядного контура генератора и составляет в оптимальном режиме работы 330-350 кА, выход нейтронов при этом составляет $\approx (0,5-0,8) \cdot 10^8$ нейтр./имп. Фотографии генератора ИНГ-103 и камеры ПФ7-02Д

представлены на рисунке 4. Изображение выносного дистанционного пульта управления, удаленного от генератора ИНГ-103 на расстояние ~15 метров и соединяющегося с генератором через жгут управления, представлено на рисунке 5.

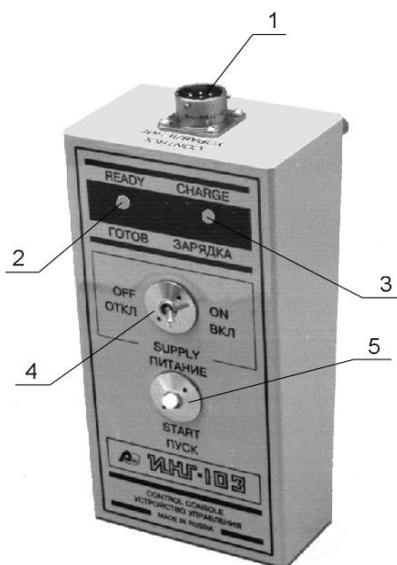


а)



б)

Рисунок 4 – Генератор нейтронов ИНГ-103 (а), камера плазменного фокуса ПФ7-02Д (б)



- 1 – вилка для подключения жгута управления,
- 2 – индикаторный светодиод окончания зарядки,
- 3 – индикаторный светодиод зарядки,
- 4 – выключатель зарядки накопительных конденсаторов,
- 5 – кнопка пуска.

Рисунок 5 – Дистанционный пульт управления ИНГ-103

Срабатывание генератора происходит следующим образом:

- при включении зарядки конденсаторов сетевое напряжение 220 В через устройство управления подается в высоковольтный блок преобразователя, на выходе которого формируется напряжение 4,5 кВ переменного тока частотой от 4 до 5 кГц, которое подается на схему умножения, где происходит формирование постоянного напряжения 23 кВ;
- постоянное напряжение 23 кВ через блок резисторов заряжает накопительные конденсаторы суммарной емкостью около 14 мкФ;
- при нажатии кнопки ПУСК (START) на пульте дистанционного управления, в блоке коммутации происходит формирование высоковольтного импульса поджига с амплитудой от 10 до 15 кВ и длительностью от 2 до 3 мкс, от которого срабатывает блок обострителя и два разрядных устройства. Через них конденсаторы с энергией 7,5 кДж разряжаются на нагрузку - камеру ПФ, где происходит ядерная реакция синтеза дейтерия с тритием (или дейтерия с дейтерием) и образование нейтронов.

Ток через камеру задается емкостью конденсаторного накопителя C , индуктивностью разрядного контура L , омическим сопротивлением контура R и зарядным напряжением U . Для измерения тока в разрядном контуре генератора и через камеру ПФ используются интегрирующие пояса Роговского. При отсутствии потерь в контуре амплитудное значение тока может быть вычислено по формуле

$$I = U / \sqrt{L/C} \quad (1)$$

В данной лабораторной работе для определения амплитуды разрядного тока применяется разрядный метод. Суть метода:

- сигнал с интегрирующего пояса Роговского подают на вход запоминающего осциллографа типа TDS2024C, осциллограмма тока представлена на рисунке 6;
- по осциллограмме измеряются период T и амплитуды первой $A1$ и второй $A2$ положительных полуволн сигнала.

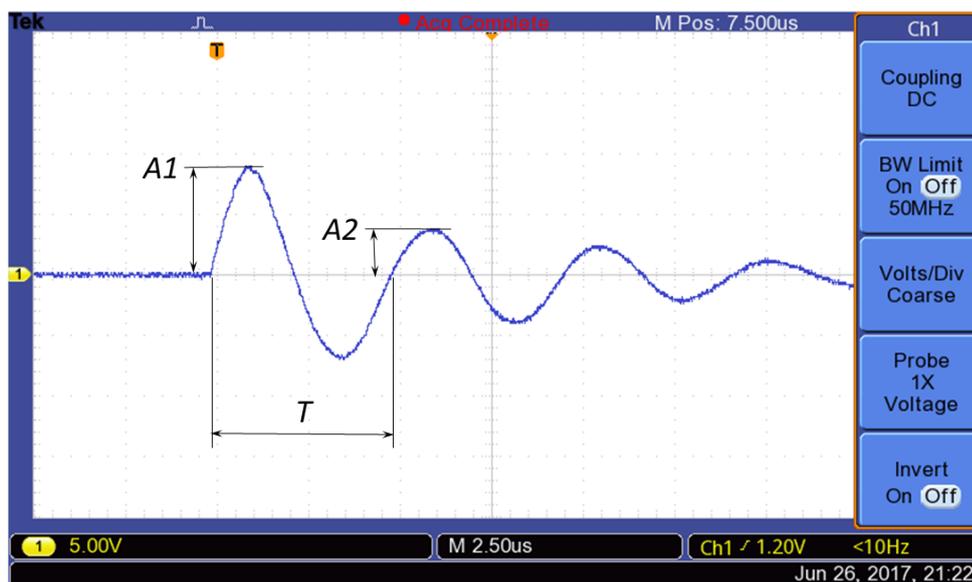


Рисунок 6 – Сигнал с интегрирующего пояса Роговского

Зная суммарную емкость накопительных конденсаторов, можно рассчитать электрические параметры установки. В генераторе ИНГ-103 используются два конденсатора КМК-30-7,1, емкостью 7,1 мкФ каждый. Индуктивность контура находится из соотношения:

$$L = \frac{T^2}{C \cdot \left[4\pi^2 + \left(\ln \frac{A1}{A2} \right)^2 \right]} \quad (2)$$

Активное сопротивление контура рассчитывается по формуле:

$$R = 2 \cdot T \cdot \frac{\ln \frac{A1}{A2}}{C \cdot \left[4\pi^2 + \left(\ln \frac{A1}{A2} \right)^2 \right]} \quad (3)$$

Амплитуда разрядного тока в контуре определяется из выражения:

$$I_m = \left(\frac{U \cdot C}{2\pi \cdot T} \cdot \left[4\pi^2 + \left(\ln \frac{A1}{A2} \right)^2 \right] \right) \cdot \left(\frac{A2}{A1} \right)^{0,25} \quad (4)$$

Зависимость выхода нейтронов от разрядного тока через камеру плазменного фокуса представлена на рисунке 7.

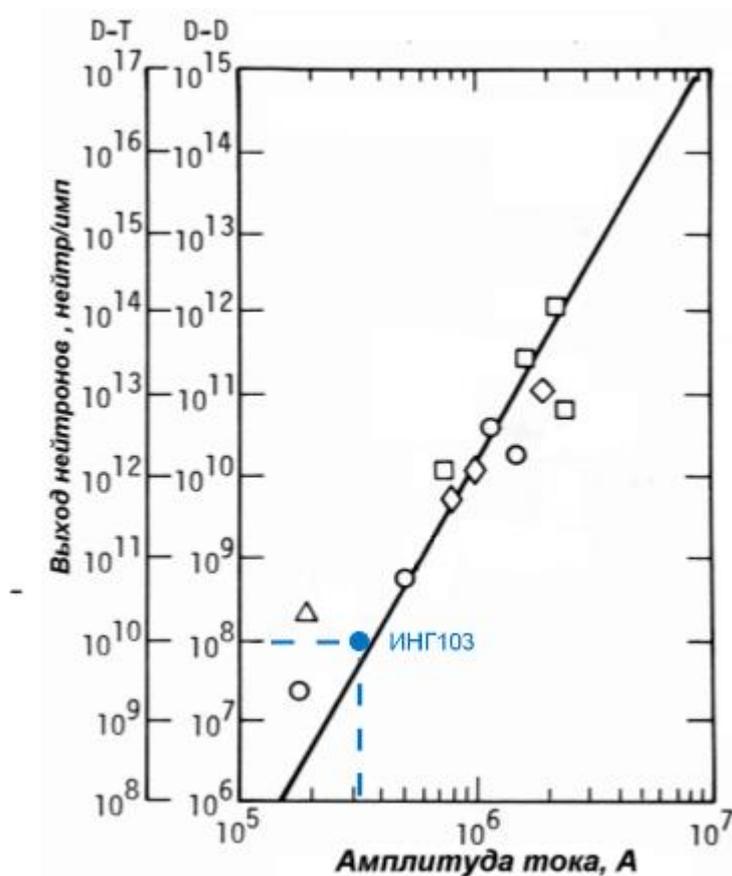


Рисунок 7 – Зависимость нейтронного выхода установок с ПФ, работающих в оптимальном режиме, от амплитуды разрядного тока

Экспериментальная часть

Описание лабораторной установки

Схема лабораторной установки представлена на рисунке 8.

Блок излучателя нейтронов ИНГ-103 с установленной камерой плазменного фокуса с дейтериевым наполнением ПФ7-02Д размещен в помещении Д-111 и соединен жгутом управления с пультом дистанционного управления ИНГ-103 на рабочем месте в Д-116. Для обеспечения напуска газа в камеру ПФ нагреватель генератора газа камеры через фильтр нижних частот подключен к источнику низковольтного питания.

К разъему генератора «ВЫСОКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ U1» подключен контрольный вольтметр АКТАКОМ АВМ-4084, предназначенный для измерения зарядного напряжения на емкостном накопителе. Коэффициент преобразования показаний вольтметра - 1,2, т.е. зарядное напряжение на конденсаторах емкостного накопителя генератора $U_{зар} [кВ] = U_{мультимер} [В] / 1,2$. Пример: 6 вольт на мультиметре соответствует $U_{зар} = 5$ кВ.

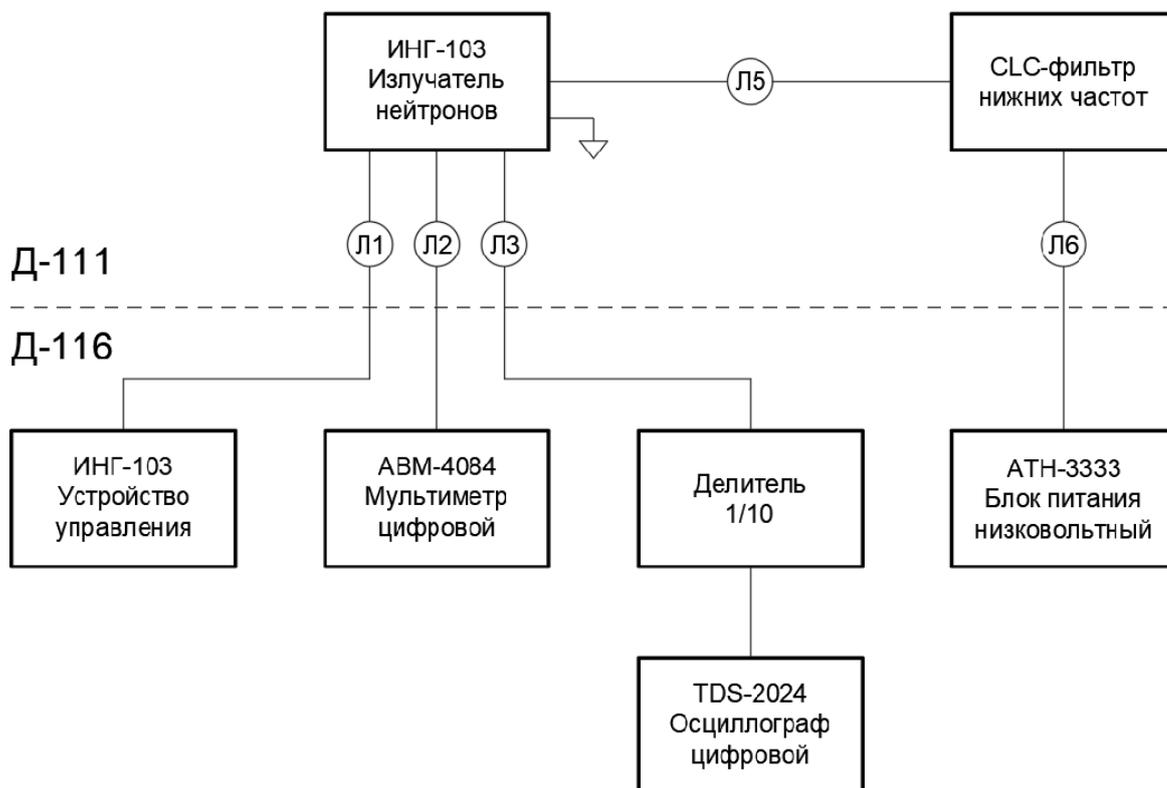


Рисунок 8 – Схема расположения оборудования

Разъем на выходе интегрирующего пояса Роговского блока излучателя нейтронов ИНГ-103 подключен через делитель напряжения 1/10 ко входу цифрового осциллографа ТДС2024С. Осциллограф используется для записи осциллограмм разрядного тока через камеру ПФ при срабатывании нейтронного генератора. Кроме того, для уверенного наблюдения момента возникновения особенности на кривой разрядного тока, на один из токоподводящих кабелей к коллектору одет дифференцирующий пояс Роговского, выход которого

присоединен к входу осциллографа TDS-2024C. Осциллограмма сигнала представлена на рисунке 9.

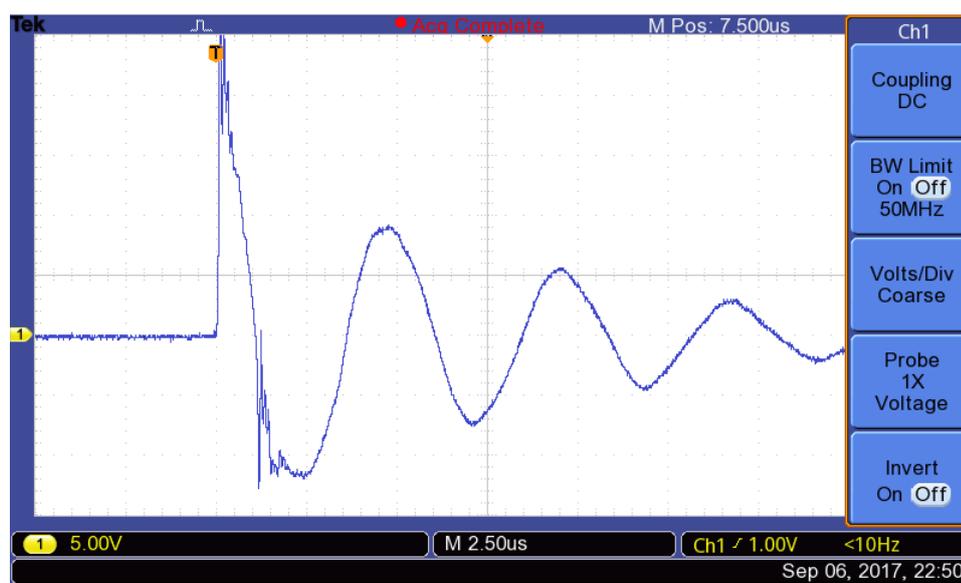


Рисунок 8 – Сигнал с дифференцирующего пояса Роговского

Порядок выполнения работы

Внимание! Все работы, связанные с приведением установки в рабочее состояние перед началом выполнения лабораторной работы, а также с пусками нейтронного генератора осуществляются только под наблюдением преподавателя!

1. Убедиться, что тумблеры ПИТАНИЕ излучателя нейтронов и переключатель ПИТАНИЕ (SUPPLY) устройства управления находятся в положении ВЫКЛ и ОТКЛ соответственно.
2. Отсоединить выходы низковольтного источника питания (ИП) от схемы. Включить ИП. В режиме короткого замыкания установить ограничение по току 0,52 А. Повернуть ручку выходного напряжения до упора влево. Выключить ИП. Подключить выходы согласно схеме.
3. Включить ИП и, плавно повышая выходное напряжение (ступеньками по 0,5-1 В, выдерживая на каждом напряжении 5-10 с), довести ток потребления до ограничения (при этом напряжение д.б. в диапазоне 8-10 В).
4. На лицевой панели блока сигнализации ИНГ-103 установить переключатель автомата ЗАЩИТА СЕТИ в положение ВКЛ. Включить тумблеры 1-2-3.
5. Выдержать генератор в таком положении 3 минуты.

6. Включить контрольный вольтметр. При необходимости установить диапазон измерения напряжения (рабочий диапазон 0 - 30 В).
7. Включить осциллограф. Установить масштаб шкалы напряжения 5В/ дел, шкалы времени – 2,5 мкс/ дел. Множитель пробника должен быть $\times 1$, входное сопротивление канала 1 МОм, ограничение полосы пропускания отключено.
8. Запуск развертки установить по растущему фронту сигнала на уровне ~ 1 В, начало развертки сместить на 3 клетки влево от середины экрана осциллографа.
9. Перевести осциллограф в режим одиночного запуска (ждущий режим для регистрации однократных процессов) нажав кнопку «Single» на лицевой панели прибора.
10. Включить зарядку высокого напряжения емкостного накопителя переключив тумблер ПИТАНИЕ (SUPPLY) на пульте управления в положение ВКЛ (ON) (см. рисунок 5) и зарядить накопитель до напряжения 5 кВ.

Контролировать значение зарядного напряжения по показаниям вольтметра АКТАКОМ АВМ-4084.

Внимание! Помните о коэффициенте преобразования показаний вольтметра!

11. При достижении требуемого значения зарядного напряжения перевести переключатель ПИТАНИЕ устройства управления в положение ОТКЛ (OFF), нажать и отпустить кнопку ПУСК (START) – генератор выдаст одиночный импульс нейтронов.

На экране осциллографа наблюдать кривую разрядного тока с интегрирующего пояса Роговского.

Повторное срабатывание импульсного нейтронного излучателя допускается производить не ранее чем через 5 мин.

12. По осциллограмме измерить последовательные амплитуды тока A_1, A_2, A_3, A_4 (для положительных и отрицательных полувольт) и периоды колебаний T_1, T_2, T_3 , отвечающие промежуткам времени между первым и третьим «нулем», вторым и четвертым «нулем», а также первым и третьим максимумами тока (положительные полувольты). Определить среднее значение T . Записать результаты измерений в рабочий журнал.

Сохранить осциллограмму в файл на ПК.

13. Перевести осциллограф в ждущий режим, зарядить емкостный накопитель до 10 кВ по п. 10 и выполнить п.п. 11, 12.
14. Перевести осциллограф в ждущий режим, зарядить емкостный накопитель до 15 кВ по п. 10 и выполнить п.п. 11, 12.
15. Провести расчеты параметров разрядного контура генератора по формулам (2) и (3), а также амплитуду первой полуволны тока I_m по формуле (4) в зависимости от зарядного напряжения U . Построить график зависимости $I_m(U)$.
16. Рассчитать значения амплитуд токов $I_{ид}$ идеального контура (без потерь) по формуле (1) при разных зарядных напряжениях U и нанести их на график п. 15.
17. Рассчитать значения коэффициента использования тока $K_{ток}$ для разных зарядных напряжений U :

$$K_{ток} = \frac{I_{m \text{ эксп}}}{I_{m \text{ ид}}}$$

Сопоставить с вычисленным значением омического сопротивления контура.

18. Рассчитать коэффициент использования запасенной энергии $K_{эн}$ для разных зарядных напряжений U :

$$K_{эн} = L \cdot \frac{I_{m \text{ эксп}}^2}{C \cdot U^2}$$

Сопоставить с омическим сопротивлением контура.

19. Результаты расчетов записать в таблицу результатов.
20. Перевести осциллограф в ждущий режим, зарядить емкостный накопитель до 21 кВ по п. 10 и выполнить п.п. 11, 12.
21. На осциллограмме тока с дифференцирующего пояса Роговского наблюдать «особенность». Измерить время особенности (время от начала разряда до появления особенности) с помощью курсоров осциллографа. На осциллограмме с интегрирующего пояса измерить величину тока (в Вольтах) для первого максимума A_m и в момент особенности $A_{особ}$.
22. Вычислить амплитуду тока I_m (в максимуме первой полуволны) по формуле (4), рассчитать значение тока $I_{особ}$ в момент особенности используя соотношение:

$$I_{ос} = \frac{I_m}{A_m} \cdot A_{ос}$$

По графику на рисунке 7 оценить ожидаемое значение выхода нейтронов за импульс генератора нейтронов ИНГ-103.

23. После окончания измерений выключить установку:

23.1 Для выключения генератора:

- нажать и отпустить кнопку ПУСК (START) устройства управления и убедиться по показаниям вольтметра, что на контрольных выходах зарядное напряжение отсутствует.
- отключить тумблеры 3-2-1 на лицевой панели блока сигнализации ИНГ-103, установить переключатель автомата ЗАЩИТА СЕТИ в положение ВЫКЛ.

23.2 Выключить низковольтный источник питания.

23.3 Выключить контрольный вольтметр и осциллограф.

Контрольные вопросы

1. Из каких составных частей состоит генератор нейтронов ИНГ-103?
2. На какие основные фазы во времени разделяют развитие разряда в камере плазменного фокуса?
2. Какие приборы используют для измерения тока в сильноточном разрядном контуре генератора ИНГ-103?
4. Какие электротехнические параметры разрядного контура генератора ИНГ-103 определяют выход нейтронов за импульс?
5. Чем определяется энергия нейтронов, генерируемых в камере плазменного фокуса?
6. Какая электрическая энергия (в Дж) запасается в емкостном накопителе ИНГ-103 при зарядном напряжении 10 кВ, 21 кВ?
7. Какая часть запасенной энергии в емкостном накопителе генератора ИНГ-103 используется эффективно?
8. Какова эффективность генерации нейтронов с энергией 2,5 МэВ генератором ИНГ-103?