

С 345

Б-825

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

1770



Н.Г. Борисов, Г.А. Иванов, И.В. Кожухов,  
Р.П. Кухарева, Ю.В. Муратов, В.П. Рашевский,  
П.И. Рыльцев, В.П. Саранцев, Ю.В. Сафрошкин,  
Е.В. Смирнов

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

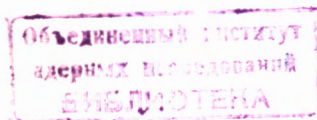
ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ РЕЗОНАНСНЫЙ  
ТРАНСФОРМАТОР

1964

2687/2 481

Н.Г. Борисов, Г.А. Иванов, И.В. Кожухов,  
Р.П. Кухарева, Ю.В. Муратов, В.П. Рашевский,  
П.И. Рыльцев, В.П. Саранцев, Ю.В. Сафрошкин,  
Е.В. Смирнов

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ РЕЗОНАНСНЫЙ  
ТРАНСФОРМАТОР



## В в е д е н и е

Рассматриваемая ниже экспериментальная установка в стадии проектирования и изготовления предназначалась для генерирования радиопульсов с параметрами:

- а) амплитуда высокочастотного (ВЧ) напряжения на ускоряющем промежутке - до  $10^6$  вольт;
- б) запасаемая ВЧ энергия - до 50 джоулей;
- в) частота генерации - около 6 Мгц;
- г) длительность пачки - 300 мксек;
- д) частота посылок - 1 в секунду.

Основная идея, на которой базируется конструкция установки, - известный принцип работы трансформатора Тесла с непрерывным возбуждением<sup>1/</sup>. Использование резонансных трансформаторов для ускорения заряженных частиц впервые описано в /2,3/ и в других работах. Специфика использования данного трансформатора - ускорение больших электронных токов при длительности пучка порядка  $10^{-8}$  сек - обусловила ряд конструктивных и схемных особенностей.

## Описание конструкции

Конструкция трансформатора, а точнее - автотрансформатора представлена на рис. 1 в упрощенном виде.

На массивном основании 1 установлен медный цилиндр 2 и спираль-обмотка 3. Цилиндр одновременно является электрическим и вакуумным кожухом возбуждаемого объема. Жесткость цилиндра рассчитана по атмосферное давление. Внутренняя поверхность полирована. Спираль представляет собой главную индуктивность высоковольтного контура, а ее параметры - главный фактор снижения резонансной частоты последнего. Кроме того, спираль является единственным конструктивным элементом, несущим расположенный внутри кожуха источник 6, весом до 30 кг, а ее внутренняя полость - единственно возможным путем подвода электрических и других коммуникаций к источнику. Сложный комплекс требований к спирали явился причиной того, что при ее изготовлении пришлось ограничиться десятью витками стальной цельнотянутой трубы  $\delta$  25 x 19 мм при шаге 60 мм и среднем диаметре около 300 мм. Наружная

поверхность подвергнута электрическому меднению с последующей электрополировкой. Верхний и нижний витки выполнены плоскими, а отогнутые концы через вакуумные уплотнения выведены за основание и во внутреннюю полость источника, находящуюся под атмосферным давлением. Таким образом, внутренний канал трубы с протянутыми там кабелями 16 находится под атмосферным давлением.

Вместе с кабелями протянута тонкая медная трубка, позволяющая продуванием сжатого воздуха в полость источника и обратным выводом нагретого воздуха через свободные просветы спирали сравнительно просто организовать охлаждение последней. Может возникнуть потребность в охлаждении спирали при длительной работе в номинальном режиме, так как выделяемая в ней средняя мощность составляет сотни ватт (до киловатта), а единственный путь отвода тепла наружу через нижний срез трубы малоэффективен. Значительное увеличение частоты посылок осложняет проблему охлаждения.

При расчетной индуктивности спирали  $7 \cdot 10^{-6}$  гн и заданной резонансной частоте  $6 \cdot 10^8$  гц требуемая величина эквивалентной емкости, приведенная к концам спирали, составляет 100 пф. Главную часть этой емкости составляет емкость электрического кондуктора 5, закрывающего источник, на внутреннюю поверхность кожуха и крышки 8, а меньшую часть — емкость витков на стенке и между собой. Поверхность кондуктора и крышки также полирована. Кондуктор экранирует вакуумный кожух источника и не-сущей его плиты 4 от мощного ВЧ поля и является вторым электродом ускоряющего промежутка d .

Величина промежутка выбрана из расчета максимального электрического поля в зазоре 150–200 кв/см, близкого к реальной прочности значительных вакуумных промежутков при давлении  $10^{-5} - 10^{-6}$  мм ртутного столба. Откачка полости трансформатора осуществляется через патрубок насоса 9 и отверстия в крышке. Вакуумные уплотнения всех сочленений выполнены из резины и на рисунке не показаны.

Вывод ускоренного пучка источника осуществляется через отверстие в кондукторе и патрубок 7 кожуха. На кожухе дополнительно имеются такие же патрубки — измерительный 10 и ввода ВЧ мощности — 14. Подробнее о них будет сказано ниже.

Рассмотренная конструкция по существу представляет собой высоковольтный LC-контур с сосредоточенными индуктивностью и емкостью. Несмотря на сложность изготовления и относительно низкую добротность такая конструкция имеет серьезное преимущество перед объемными и другими резонаторами, заключающееся в более низкой резонансной частоте при тех же габаритах и мощности (см. рис. 1 и, например, <sup>14/</sup>).

### Система ВЧ возбуждения

Упрощенная схема контура трансформатора и сопряженных с ним основных электрических цепей изображена на рис. 2. Принципиально возможно возбуждать контур через любую петлю связи. Практически удобнее подавать ВЧ мощность непосредственно на часть витков спирали (автотрансформаторное возбуждение). При этом не требуется отдельной мощной петли, трудновписываемой в тесный объем кожуха. Конструкция коаксиального питающего фидера 13, 14 и вводного изолятора 15 достаточно проста.

Теоретические оценки поверхностных потерь в спирали, а также измерения эквивалентного сопротивления потерь контура на малом уровне колебаний дают значение добротности  $Q = 700 + 20\%$ . Более высокого качества от подобной конструкции трудно ожидать, в частности, потому, что не просто удовлетворить высоким требованиям, которые предъявляются к электрическим контактам основание-спираль-кондуктор и т.д. Следует учесть большую величину реактивных токов (тысячи ампер), а также возможность быстрого демонтажа установки для доступа к источнику. Возможные пути повышения добротности - серебрение поверхности спирали и пайка основных контактов.

При известных  $Q = 700$ ,  $V_{\max} = 10^6$  в и  $\rho = 280$  ом требуемая мощность раскачки составляет 1,5 мвт. Указанные энергетические характеристики трансформатора привели к выбору генераторной лампы ГИ-28 и коэффициента трансформации напряжения  $V/V_a = 30$ , которому соответствует подключение фидера возбуждения ко второму витку спирали. Приведенное к фидеру резонансное сопротивление контура, составляющее около 200 ом, удовлетворительно согласуется с внутренним сопротивлением лампы. Ввиду того, что  $\lambda_0 = 2\pi c/\omega_0 = 50$  м, а длина фидера порядка одного метра, волновое сопротивление последнего не играет заметной роли. Фидер выбран низкоомным из соображения минимальных потерь ВЧ напряжения, а его конструктивные размеры - из условия электрической прочности вводного изолятора.

Резонансный электронный разряд <sup>/5,8/</sup> при данном сочетании  $d$  и  $\omega_0$  приходится на весьма малые амплитуды и практически не сказывается на развитии импульса ВЧ напряжения в зазоре (в отличие от более высокочастотных систем). Это позволило построить систему надежного автогенераторного ВЧ возбуждения на одном триоде ГИ-28 (рис. 21) и обойтись без дополнительного генератора предвозбуждения <sup>/4/</sup>.

Автогенератор выполнен по схеме с общим катодом с трансформаторной обратной связью с параллельным питанием.

Мощность на сетку подается с дополнительной петлей связи 18, помещенной внутри основной спирали. Площадь, местоположение и полярность включения петли,

а также величина корректирующей емкости  $C_{ок}$ , способствующей улучшению формы огибающей, подбираются экспериментально. Теоретические оценки для облегчения настройки оптимального режима генерации помогают мало ввиду отсутствия надежных сведений о геометрических и фазовых искажениях поля в нижней части кожуха трансформатора и о паразитных параметрах схемы. Наличие внутренней петли связи и дополнительного "сеточного" вводного изолятора 17 (см. рис. 1) представляет известное неудобство. В более высокочастотных системах<sup>/4/</sup> от него можно избавиться, используя схему автогенератора с общей сеткой и ВЧ разделительным дросселем по цепи накала лампы. В данном случае этот вариант трудно реализовать из-за громоздкости дросселя (ток накала порядка 800 ампер). Больше подходит схема двухконтурного автогенератора с заземлением катодом, дополнительным колебательным контуром в цепи сетка-катод и наружной обратной связью через емкость анод-сетка (на рис. 2 не показаны). Такой вариант возбуждения испытывался, но удовлетворительных результатов не дал ввиду неудачного сочетания паразитных параметров лампы и трудности сопряжения двух резонансных частот. Таким образом, лишь внутренняя связь в макетном варианте трансформатора обеспечила длительную надежную работу ВЧ генератора при количестве сбоев порядка 5% и амплитуде ВЧ напряжения  $V_a$  на аноде лампы, близкой к амплитуде импульса анодного модулятора  $E_a$ .

#### Анодный модулятор

Схема модулятора, питающего анодную цепь генератора, - обычная с использованием одной искусственной формирующей линии (волновое сопротивление около 5 ом) и выходного повышающего трансформатора (коэффициент трансформации - 6). Главная причина введения трансформатора - необходимость полного исключения высоковольтных постоянных напряжений из шкафа ВЧ генератора; это, в свою очередь, желательно в связи с большим объемом наладочных и измерительных работ в ВЧ системе.

Трансформатор является ответственным элементом модулятора, передающим как большие импульсные напряжения (до 50 кВ), так и большие импульсные мощности (до 5 Мвт). Он собран на сердечнике II-типа: сечение одного керна  $150 \times 190 \text{ мм}^2$ , размер окна  $170 \times 85 \text{ мм}^2$ . Секции первичной ( $w_1 = 20$ , провод ПБД 2,5) и вторичной ( $w_2 = 120$ , провод ПБД 1,6) обмоток поровну распределены по обоим кернам сердечника. Главная изоляция между слоями и обмотками - бумажная лакоткань. Катушки подвергнуты вакуумной сушке с последующей многократной пропиткой масляным лаком и сушкой при высокой температуре. Для обеспечения электрической прочности высоковольтных вводов и охлаждения обмоток при длительной работе трансформатор помещен в масляный кожух. Габариты кожуха  $500 \times 500 \times 400 \text{ мм}^3$ , полный вес трансформатора около 200 кг. Перед началом эксплуатации трансформатор испытывался на

длительную работу в предельном режиме (активная нагрузка 200 ом, амплитуда выходного импульса 33 кв) и хорошо выдержал испытание. При длительности импульса около 300 мксек спад не превышал 10%, а длительность фронтов - 30 мксек. В процессе длительной эксплуатации системы со стороны трансформатора отказов не было.

В качестве коммутирующего элемента в модуляторе использована пара параллельно соединенных водородных тиратронов ТГИ1-700/25. Поджиг тиратронов с нужным периодом (см. рис. 3) осуществляется синхронизирующим устройством, представляющим собой простой релаксатор на основе неоновой лампы и реле. Зарядка искусственной линии модулятора производится от выпрямителя со стабилизированным порогом, который можно регулировать от 6 до 12 кв. Схема выпрямителя не чувствительна к коротким замыканиям и более подробно описана в /7/.

#### Схема измерения

Основная измерительная ВЧ система должна выполнять две главные функции:

1. Измерение с выходом на стрелочный прибор установившейся амплитуды ВЧ напряжения в зазоре.

2. Визуальный контроль фазы и формы кривой ВЧ напряжения в зазоре.

Для решения первой задачи в ускорительной технике используется, как правило, пиковый вольтметр, соединенный с калиброванной измерительной петлей, помещенной внутри или вблизи резонатора /4,8/. Однако для решения второй задачи петля не подходит. Даже если поместить ее непосредственно в рабочий зазор, то мгновенное напряжение на петле не будет точно повторять напряжение в зазоре в силу зависимости от ряда трудноучитываемых факторов. Если же петля из зазора выносится, а в данном случае помещение ее в зазор невозможно вследствие больших напряженностей поля, то влияние этих факторов усугубляется. Отмеченные обстоятельства послужили основанием для использования емкостного датчика в качестве основного измерителя.

Конструктивно датчик представляет собой овальное тело вращения 10 с проводящей и хорошо полированной поверхностью, помещенное в патрубок кожуха и изолированное слоем диэлектрика (пленка 12 из фторопласта) от стенок и фланца 11 патрубка. Вывод штыря датчика наружу оформлен в виде вакуумно-плотного коаксиального разъема. Электрически датчик представляет собой емкостный делитель (см. рис. 2) с весьма большим коэффициентом деления. Одно плечо делителя образовано емкостью  $C_1$  между овальным торцом датчика и наружной поверхностью кондуктора. Второе плечо делителя образовано емкостью  $C_2$  боковой и задней поверхностями датчика на стенке патрубка и фланца. Второе плечо может быть реализовано подключением к выводу датчика наружного конденсатора. Внутренняя емкость предпочтительнее по двум

причинам: а) исключаются высоковольтные пробоя в измерительных цепях при возможном обрыве наружной емкости; б) снижается влияние наводок в измерительной цепи.

Описанный датчик лишен недостатков петли: он может быть помещен непосредственно в зазоре. На измерительный кабель и далее в измерительное устройство передается напряжение  $V_2 = \frac{V}{1 + C_1/C_2}$  (при  $\rho_{\omega} C_2 \gg 1$ ,  $\rho_{\omega} C_H \ll 1$ ), однозначно определяемое измеряемым напряжением  $V$  и коэффициентом деления. Последний можно определить расчетным или экспериментальным путем. Приведенные выше соотношения служат основанием для выбора  $C_1, C_2, \rho, C_H$ .

Выходное напряжение датчика через согласованный кабель подается на пиковый двухтактный детектор с выходом на вольтметр электростатической системы С-95. Показания вольтметра пропорциональны амплитуде  $V$ . Осциллографическое наблюдение  $V_2$  осуществляется непосредственно на выходном конце соединительного кабеля. Периодический сброс показаний вольтметра перед каждым следующим тактом осуществляется контактами реле, связанного с устройством синхронизации. Соответствующие диаграммы приведены на рис. 3.

Изоляция контактов реле, равно как и всех цепей, связанных с потенциальным входом С-95, должна обладать малой утечкой. Коэффициент передачи всего измерительного тракта от емкости  $C_1$ , задающей ток делителя, до шкалы измерителя поддается расчету легче, чем при использовании петли. Однако полностью доверять показаниям прибора можно лишь после экспериментальной калибровки. В макетном варианте резонансного трансформатора коэффициент передачи составил  $1700 \pm 5\%$ .

Емкостный измеритель не лишен недостатков. Так, он чувствителен к постоянной составляющей и требует применения двухполупериодного детектора. Использование его в конструкции, показанной на рис.1, где ширина зазора ( $a$ , следовательно, и величина  $C_1$ ) жестко не фиксирована, чревато появлением погрешности "смещения" вертикальной оси кондуктора относительно оси кожуха. Эту погрешность можно скомпенсировать, применяя дифференциальное включение нескольких одинаковых диаметрально расположенных датчиков.

#### Экспериментальные результаты. Выводы

На рис. 3-5 приведены диаграммы и осциллограммы, отражающие работу резонансного трансформатора и комплекса устройств с ним связанных. В крупном масштабе (рис. 3) показаны такты работы генератора запуска (диаграмма срабатываний реле сброса показаний, изменение заряда емкости формирующей линии (для различных порогов зарядки), показания пикового вольтметра. В среднем масштабе показаны постоянная составляющая анодного напряжения при разомкнутой и замкнутой обратной



связи генератора (рис. 4а, и б), а также импульс ВЧ напряжения датчика при холостом ходе (рис. 4-в) и при ускорении тока 100 а (рис. 4-г). В развернутом масштабе показаны осциллограммы ВЧ напряжения датчика при холостом ходе резонансного трансформатора (рис. 5-а) и при ускорении тока около 100 ампер (рис. 5-б). Амплитуда ВЧ напряжения в зазоре для осциллограмм составляет 800 кв.

Макет резонансного трансформатора, запроектированный на максимальное напряжение 1 Мв при максимальной частоте повторения 1 гц запущен в Лаборатории высоких энергий в январе 1963 г. Трансформатор достаточно компактен, надежен и неприхотлив в эксплуатации. Наиболее сложными моментами при его наладке были:

- а) обеспечение правильной фазировки напряжения обратной связи и оптимального режима самовозбуждения генератора;
- б) обеспечение электрической прочности тракта передачи ВЧ мощности от анода лампы на спираль;
- в) обеспечение качества поверхностей и электрической прочности рабочего зазора.

В макете удалось поднять напряжение до 800 кв, причем главными препятствиями его дальнейшего повышения явились именно плохое качество поверхности алюминиевого кондуктора (выбор алюминия обусловлен относительной простотой технологии изготовления), трудность обеспечения симметрии зазора при частых разборках и сборках кожуха и источника, несовершенство конструкции фидера. Нужно отметить и то, что приведенная ранее величина добротности с течением времени заметно падает (до полутора раз) за счет окисления медного покрытия спирали. Так, уровень 800 кв получен при емкости линии 40 мкф, зарядном напряжении 9 кв, импульсной мощности, снимаемой с трансформатора, около 4 Мвт вместо ожидаемых 2,5-3 Мвт. Одной из причин перерасхода мощности может также служить неоптимальная фазировка контура автогенератора, приводящая к чрезмерно большим потерям в сеточной цепи лампы.

В заключение авторы благодарят М.Ф. Васильева и Э.Ф. Матвеева за большую работу, сделанную при монтаже и наладке установки.

#### Л и т е р а т у р а

1. М.А.Бабилов и др. Техника высоких напряжений. ГЭИ, 1963 г.
2. Л.В. Мысовский, В.Н. Рукавишников. Ускорение положительных и отрицательных ионов полем переменного тока высокой частоты. ДАН, серия А, 53, 1922 г.
3. D.H.Sloan. A Radiofrequency High Voltage Generator. Phys. Rev., v.47, N 62, 1935.

4. А.М. Глазов. Одиночный резонатор-ускоритель протонов до энергии один Мэв. Диссертация ОИЯИ, 1963 г.
5. Б.А. Загер, В.Г. Тишин. Резонансный высокочастотный разряд в циклотроне. ЖТФ, 1963, № 9.
6. Электрофизическая аппаратура (Сборник статей). Выпуск 1. Атомиздат, 1963 г.
7. Ю.В. Сафрошкин. Стабилизаторы постоянного напряжения с двухконтурным питанием. Препринт ОИЯИ, № 1363, Дубна, 1963 г.

Рукопись поступила в издательский отдел  
22 июля 1964 г.

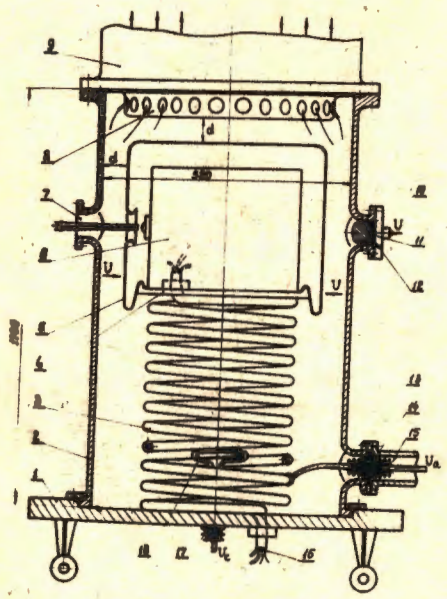


Рис.1.

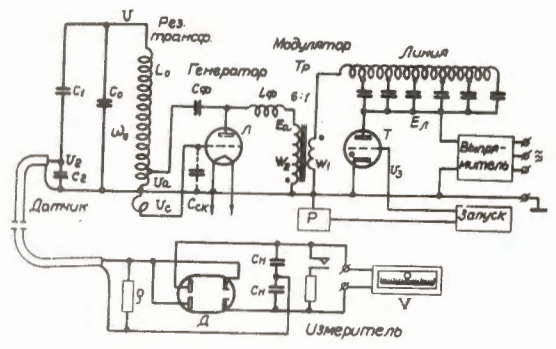


Рис.2.

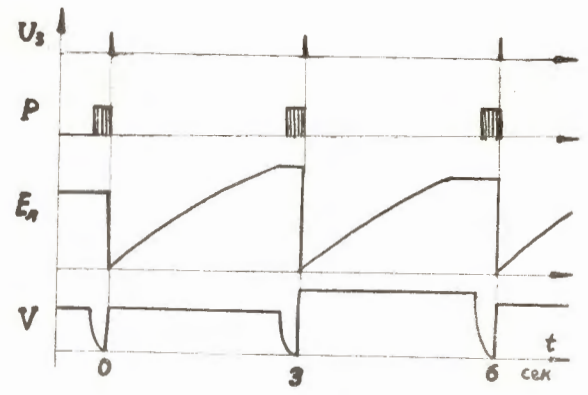


Рис.3.

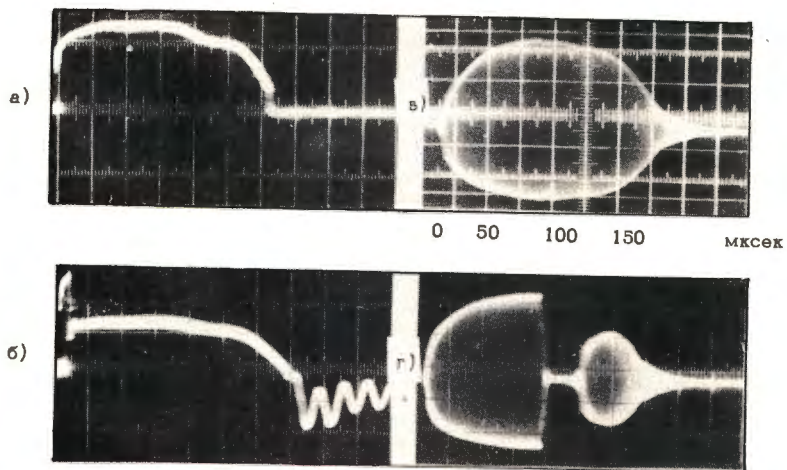


Рис.4.

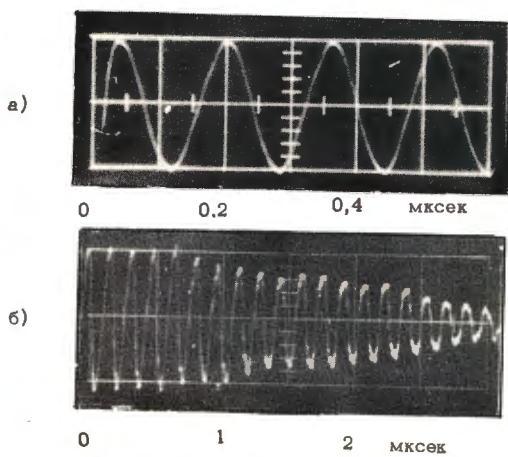


Рис.5.