



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2011–29
ОУ У-70, ОЛУ

А.Н. Воробьев, А.Ю. Евстифеев

**Импульсный трансформатор модулятора
анодного напряжения системы ВЧ-питания
линейного ускорителя ионов
(конструкция, технология изготовления,
результаты испытаний)**

Протвино 2011

Аннотация

Воробьев А.Н., Евстифеев А.Ю. Импульсный трансформатор модулятора анодного напряжения системы ВЧ-питания линейного ускорителя ионов (конструкция, технология изготовления, результаты испытаний): Препринт ИФВЭ 2011-29. – Протвино, 2011. – 17 с., 8 рис., 2 табл., библиогр.: 6

В работе представлено описание конструкции сухого импульсного трансформатора модульного модулятора анодного напряжения системы ВЧ-питания линейного ускорителя ионов. Описана технология изготовления импульсного трансформатора. Выбран компаунд с оптимальными характеристиками для вакуумной заливки высоковольтной части трансформатора (катушки). Описаны установка для вакуумной заливки и испытательный стенд для проверки электропрочности залитой катушки. Приведены технология и методика высоковольтных испытаний катушки.

Abstract

Vorobiev A.N., Evstifeev A.Yu. The Pulse Transformer of Anode Modulator for HF Power System Ion Linear Accelerator (Construction, Technology, Tests Results): IHEP Preprint 2011-29. – Protvino, 2011. – p. 17, figs. 8, tables 2, refs.: 6.

The design description air pulse transformer of anode modulator for HF power system ions linear accelerator is presented. The fabrication method pulse transformer is described. The compound with optimal parameters for vacuum filling high-voltage part of transformer (coil) is selected. The degassing plant and test desk for control dielectric strength filled coil are described. The technology and method high-voltage test of coil are given.

Содержание

1. Введение.....	3
2. Технические характеристики трансформатора.....	3
3. Конструкция.....	4
4. Результаты эксплуатации трансформаторов с заливкой компаундом ЭД-20.....	6
5. Выбор оптимального компаунда для заливки.....	6
6. Установка вакуумной заливки.....	9
7. Технология заливки катушки трансформатора компаундом «Стиросил».....	12
8. Электрические испытания.....	13
9. Заключение.....	16
Список литературы.....	17

1. Введение

В системах ВЧ-питания импульсных линейных ускорителей ионов применяются устройства, формирующие прямоугольные импульсы высокого напряжения, подаваемого на аноды генераторных ламп. Такие устройства называются модуляторами [1]. В классической схеме построения модуляторов импульс требуемого напряжения получается на одном мощном импульсном трансформаторе, что имеет определенные недостатки, отмеченные в [2]. В работах [2, 3] предложена модульная структура модулятора, в которой требуемое напряжение выходного импульса создается суммированием напряжений нескольких модулей.

2. Технические характеристики трансформатора

В состав модулятора, построенного по модульной структуре [2], входят однотипные сухие импульсные трансформаторы.

При проектировании импульсного трансформатора для определения его размеров, формы, конструкции необходимо учитывать следующие основные электрические параметры: напряжение на первичной обмотке; напряжение на вторичной обмотке;

сопротивление нагрузки вторичной обмотки; максимальное напряжение между вторичной обмоткой и экраном; минимальная длительность импульса; максимальная длительность фронта импульса; спад напряжения на вершине импульса; частота повторения импульсов.

В соответствии с [2], импульсный трансформатор должен иметь следующие технические характеристики:

1. Напряжение на первичной обмотке: 400 ± 3 В.
2. Напряжение на вторичной обмотке: 1000 ± 10 В.
3. Сопротивление нагрузки вторичной обмотки: 6,25 Ом.
4. Максимальное напряжение между вторичной обмоткой и заземленным экраном: 32 кВ.
5. Длительность импульса по уровню 0,9: не менее 80 мкс.
6. Длительность фронта импульса: не более 10 мкс.
7. Спад напряжения на вершине: не более 1%.
8. Частота повторения импульсов: 25 Гц.

Напряжения на первичной и вторичной обмотках определяют требования к материалу изоляции между обмотками и корпусом (экраном).

Сопротивлением нагрузки выхода вторичной обмотки определяется мощность трансформатора и его конструкция – геометрические размеры и форма.

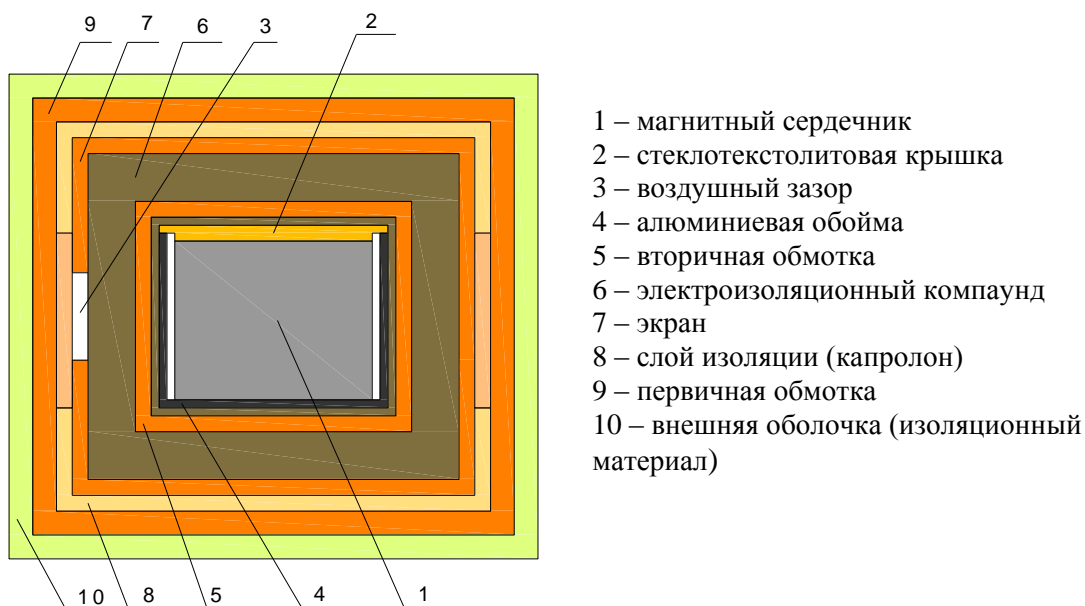
Длительность передаваемого импульса и его фронтов зависит от количества витков в обмотках и диэлектрической проницаемости материала изоляции.

От требований к спаду напряжения на вершине импульса зависят геометрические размеры магнитной системы и количество витков обмоток.

3. Конструкция

Тороидальная форма импульсного трансформатора [4] обеспечивает получение требуемых параметров.

Поперечное сечение импульсного трансформатора схематично представлено на рис. 1.



- 1 – магнитный сердечник
- 2 – стеклотекстолитовая крышка
- 3 – воздушный зазор
- 4 – алюминиевая обойма
- 5 – вторичная обмотка
- 6 – электроизоляционный компаунд
- 7 – экран
- 8 – слой изоляции (капролон)
- 9 – первичная обмотка
- 10 – внешняя оболочка (изоляционный материал)

Рис. 1. Сечение тороидального импульсного трансформатора.

На алюминиевой обойме 4, в которой заключен пермаллоевый сердечник 1 в форме тороида, намотана медная вторичная обмотка 5. Представленный импульсный трансформатор является повышающим – число витков вторичной обмотки 5 больше числа витков первичной обмотки 9. Для уменьшения межвитковой паразитной емкости, влияющей на крутизну фронта передаваемого импульса, необходимо минимизировать количество слоев каждой из обмоток. Первой наматывается вторичная обмотка, уложенная в один слой. Для обеспечения необходимой электрической и механической прочности обмотка 5 заливается в вакууме компаундом 6 толщиной до 7 мм. Компаунд заливается в пространство между обмоткой 5 и медным экраном тороидальной формы 7 с продольным зазором 3 по внешней стороне.

Залитая конструкция носит условное наименование «катушка» (далее по тексту – катушка).

На катушке монтируется слой изоляции 8, на который наматывается первичная обмотка 9. Вся конструкция обматывается электроизоляционной внешней оболочкой 10.

Разделение первичной и вторичной обмоток импульсного трансформатора заземленным экраном позволяет уменьшить паразитную емкость трансформатора и увеличить крутизну фронта выходного импульса.

4. Результаты эксплуатации трансформаторов с заливкой компаундом ЭД-20

Изготовленные в условиях промышленного производства трансформаторы описанной конструкции с использованием компаунда ЭД-20 с тальком в качестве наполнителя успешно прошли стендовые испытания [3]. В процессе опытной эксплуатации, в ряде экземпляров трансформаторов наблюдалось механическое разрушение монолита компаунда б, что приводило к электрическому пробоям вторичной обмотки на корпус и, как следствие, выходу модулятора из строя. При этом в пробитых трансформаторах визуально отмечено крайне неравномерное распределение по толщине компаунда (оседание) талька, используемого в качестве наполнителя.

5. Выбор оптимального компаунда для заливки

Очевидно, что разрушение компаунда объясняется несоответствием его физических характеристик условиям эксплуатации импульсных трансформаторов.

Для обеспечения долговременной надежной работы импульсного трансформатора необходимо учитывать следующие характеристики компаунда:

- время жизни – время нахождения компаунда в жидком состоянии, что важно для обеспечения однородности компаунда при вакуумной заливке с целью устранения неоднородностей в толще диэлектрика (устранение газовых пузырей);
- относительное удлинение (эластичность) – физическая величина, характеризующая изменение формы материала без разрушения;
- электрическая прочность – физическая величина, характеризующая способность материала выдерживать без пробоя приложенное напряжение;
- диэлектрическая проницаемость – физическая величина, характеризующая свойства диэлектрической среды, влияющая на крутизну фронта передаваемого импульса.

Компаунд для заливки должен иметь:

- время жизни, позволяющее обеспечить его однородность методом вакуумной заливки;

- удовлетворительную эластичность (относительное удлинение);
- достаточную электрическую прочность;
- минимально возможную диэлектрическую проницаемость для обеспечения максимальной крутизны фронтов импульса.

В таблице 1 приведены характеристики некоторых электроизоляционных компаундов.

Выше указано, что в высоковольтной части (катушке) разрушенных трансформаторов применялся компаунд на основе эпоксидной смолы ЭД-20 с наполнителем для придания эластичности.

Смола эпоксидно-диановая ЭД-20 неотвержденная представляет собой растворимый и плавкий реакционно-способный олигомерный продукт на основе эпихлоргидрина и дифенилолпропана [5]. В составе компаунда на основе эпоксидной смолы для придания эластичности и уменьшения хрупкости применялся пластификатор ТГМ-3 и наполнитель – тальк.

Как следует из данных, приведенных в таблице 1, эпоксидная смола ЭД-20 имеет низкую эластичность и большое время жизни, в данном случае приводящее к осаждению наполнителя. Указанные особенности явились причиной разрушения компаунда.

Компаунды марки «Этал» ЗАО «ЭНПЦ ЭПИТАЛ» представляют собой модифицированную наполненную эпоксидную смолу и имеют самую высокую электрическую прочность. К недостаткам относятся твердость, хрупкость и высокая диэлектрическая проницаемость, приводящая к затягиванию фронта передаваемого импульса. Кроме того, материалам «Этал-50Э» марок А и В необходимо горячее отверждение, что усложняет процесс производства.

Достоинство материалов марки «Виксинт» состоит в том, что они после полимеризации представляют собой резиноподобную субстанцию. По электрической прочности они оказываются хуже эпоксидной смолы, имеют большее значение диэлектрической проницаемости по сравнению с ЭД-20, что, как уже упоминалось выше, снизит крутизну фронтов передаваемого импульса. Еще один их недостаток – ограниченная пригодность к вакуумной заливке по причине густой консистенции и малого времени жизни.

Компаунды марки «Пентаэласт» – аналог компаундов марки «Виксинт», за исключением электрической прочности. Показатель электропрочности марок 711 и 722 превосходит аналогичный показатель эпоксидного компаунда более чем в 1,5 раза, диэлектрическая проницаемость немного выше, чем у ЭД-20. Данные материалы также мало подходят для вакуумной заливки вследствие небольшого времени жизни.

Таблица 1

Материал	Время жизни	Относительное удлинение, %	Электрическая прочность, кВ/мм	Диэлектрическая проницаемость
Эпоксидная смола ЭД-20	1,5 ч	2	16	3,3
Этал-50Э марки А гор	4 ч	4,5	72	4,0
Этал-50Э марки В	4 ч	4	72	4,0
Этал-1471	2 ч	4	50	4,4
Этал-1471Т	2 ч	4	50	4,4
Этал-1471А	2 ч	4	50	4,4
Виксинт К-68	0,5 ч	-	15	4
Виксинт ПК-68	0,5 ч	-	15	4
Виксинт У-1-18	0,5 ч	160	13	6,0
Виксинт У-4-21	0,5 ч	100	13	6,0
Пентаэласт 1130	0,5 ч	-	9,1	3,7
Пентаэласт 711	0,5 ч	120	25	4
Пентаэласт 722	0,5 ч	110	25	3,2
Стиросил	2 ч	100	30	3,3
Сурел-СЛ-КСТ	2 ч	80	12	3,0
СТЕП	2 ч	50	18	3,6

Компаунды фирмы «СУРЭЛ» «Стиросил», «Сурел-СЛ-КСТ» и «СТЕП» выполнены на основе силикона. После полимеризации компаунды представляют собой резиноподобную субстанцию. По показателю электрической прочности компаунды фирмы «СУРЭЛ» превосходят данный показатель компаунда на основе эпоксидной смолы, а диэлектрическая проницаемость близка по значению к ЭД-20. Но при этом компаунды фирмы «СУРЭЛ» превосходят по эластичности эпоксидную смолу в разы. Время жизни сопоставимо с временем жизни ЭД-20, и их также можно использовать для вакуумной заливки. Полимеризуются компаунды фирмы «СУРЭЛ» при комнатной температуре.

Из сравнительного анализа характеристик компаундов следует, что компаунд «Стиросил» по совокупности характеристик наиболее соответствует перечисленным выше требованиям. Данный материал имеет электропрочность почти в 2 раза выше, чем у компаунда на основе эпоксидной смолы, достаточно большое время жизни, что

позволяет использовать данный компаунд для вакуумной заливки, при этом в компаунде не используются никаких примесей, что могло бы привести к их неравномерному распределению. Диэлектрическая проницаемость такая же, как у ЭД-20, что не приводит к ухудшению формы выходного импульса. После отверждения «Стиросил» превращается в резиноподобное вещество, не разрушающееся в процессе работы импульсного трансформатора.

6. Установка вакуумной заливки

Для вакуумной заливки катушек импульсных трансформаторов была разработана и изготовлена специальная установка, позволяющая заливать катушку в заливочной форме при давлении не более 5×10^{-2} мм рт. ст. Структурная схема установки представлена на рис. 2. На рис. 3 дан общий вид установки.

Вакуумный агрегат 1 предназначен для откачки газов из емкостей 3 для компаунда и 4 для заливочной формы.

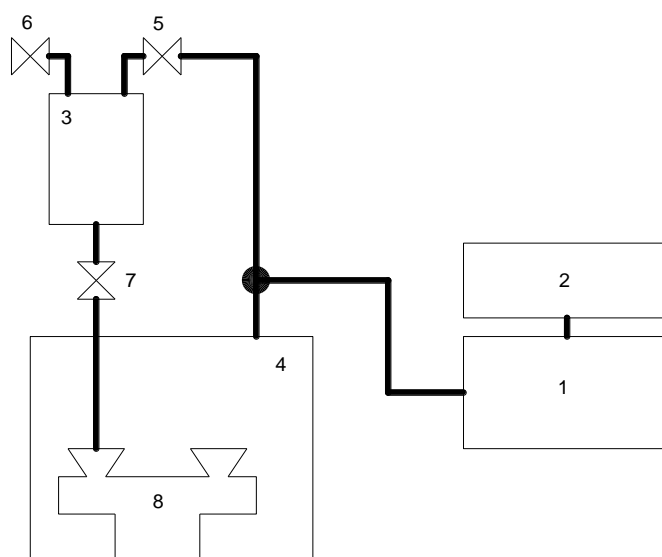


Рис. 2. Структурная схема установки вакуумной заливки. 1 – Вакуумный агрегат. 2 – Вакуумметр ионизационно-термопарный ВИТ-2П. 3 – Емкость для компаунда. 4 – Емкость для заливочной формы. 5, 6, 7 – Вентили. 8 – Заливочная форма.

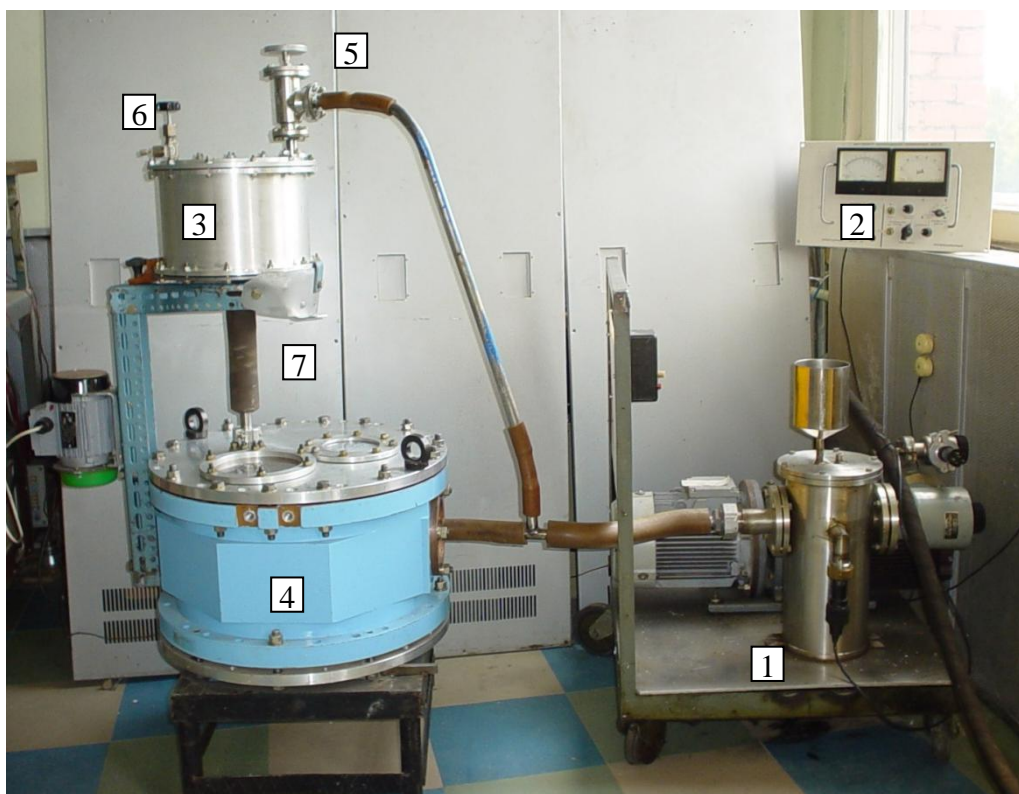


Рис. 3. Общий вид установки вакуумной заливки. 1 – Вакуумный агрегат. 2 – Вакуумметр ионизационно-термопарный ВИТ-2П. 3 – Емкость для компаунда. 4 – Емкость для заливочной формы. 5 – Вентиль для вакуумирования емкости с компаундом. 6 – Вентиль для подачи атмосферного давления. 7 – Вентиль для подачи компаунда в заливочную форму.

На рис. 4 приведена фотография заливочной формы после завершения заливки. Заливочная форма (рис. 4) представляет собой экран 5 импульсного трансформатора с герметизированной обечайкой 2 зазором по внешней стороне. В экране имеются отверстия для высоковольтных выводов, под которыми закреплены стаканы 3, предназначенные для формирования изоляции высоковольтных выводов трансформатора. Внутри экрана с обеспечением требуемых зазоров помещен магнитный сердечник с намотанной вторичной обмоткой, жестко фиксированный к заливочным стаканам 3 с помощью штанг высоковольтных выводов трансформатора.

В верхней части заливочной формы установлены расширительные бачки 4, один из которых служит для заливания компаунда в заливочную форму, второй – для контроля уровня компаунда и выхода газов.

Контроль за давлением внутри емкостей (см. рис. 3) осуществляется при помощи вакуумметра 2.

Прозрачные смотровые окна в крышке емкости 4 предназначены для визуального контроля за процессом заливки. Вентиль 5 предназначен для перекрытия магистрали от вакуумного насоса к емкости для компаунда. Вентиль 6 – натекагель для подачи атмосферного давления в емкости. Вентиль 7 служит для перекрытия и регулировки скорости поступления компаунда в заливочную форму.

Конструктивно данный вентиль состоит из отрезка толстостенного вакуумного шланга и регулируемого рычажного зажима (на фото не показан).

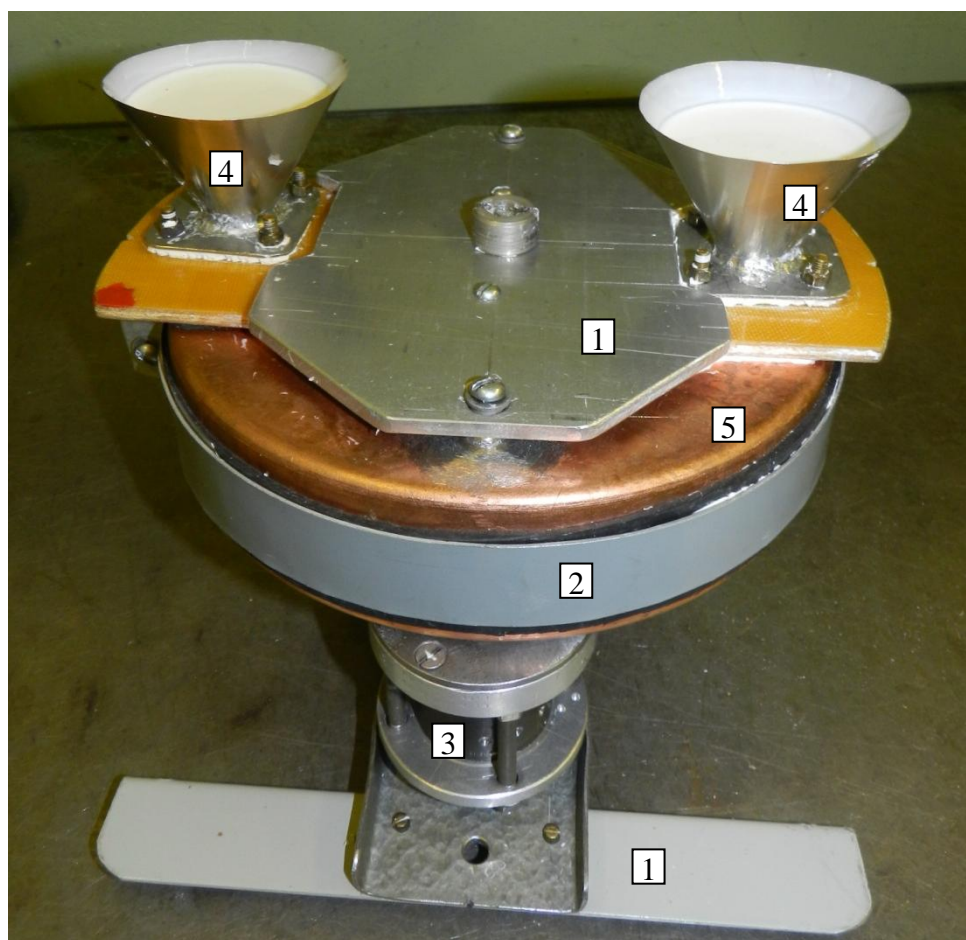


Рис. 4. Заливочная форма. 1 – Кронштейны крепления заливочной формы. 2 – Герметизирующая обечайка. 3 – Стакан-форма высоковольтного вывода. 4 – Расширительный бачок. 5 – Экран импульсного трансформатора.

7. Технология заливки катушки импульсного трансформатора компаундом «Стиросил»

Для обеспечения качественной заливки катушки импульсного трансформатора компаундом необходимо выполнение последовательности операций при соблюдении определенных условий.

В результате экспериментальной отработки процесса заливки низкомолекулярным полимером «Стиросил» предложена следующая технология (см. рис. 2, 3).

1. Собрать заливочную форму:

- спаять полуэкраны, поместив внутри сердечник с обмоткой;
- установить стаканы формирования высоковольтных выводов;
- закрепить расширительные бачки, совместив отверстия экрана и расширительных бачков.

2. Установить заливочную форму вниз стаканами высоковольтных выводов в емкость 4 и закрепить, разместив один из расширительных бачков под сливом емкости 3.

Установить крышку объема 4 и вентиль 7.

Закреть вентили 5, 7.

3. Откачивать емкость 4 с формой до рабочего давления не более 5×10^{-2} мм рт.ст. (4 мВ по шкале милливольтметра вакуумметра) при температуре $18 \pm 2^\circ\text{C}$, в течение 1 часа (время откачивания считать с момента достижения рабочего вакуума).

4. Приготовить 1200 г компаунда согласно инструкции по применению компаунда.

5. Снять прозрачное смотровое окно крышки емкости 3.

6. Залить компаунд в емкость 3.

7. Установить смотровое окно емкости 3 и закрыть вентиль 6.

8. Медленно открыть вентиль 5, следя через смотровое окно объема 3 за состоянием компаунда (не допускать обильного вспенивания).

9. После полного открытия вентиля 5 проводить откачку в течение 15 минут.

10. Открыть вентиль 7; компаунд начнет самотеком поступать в заливочную форму.

11. Скорость истечения компаунда в заливочную форму регулировать зажимом вентиля 7. Наблюдать за уровнем компаунда в расширительном бачке (перелив не допускается).

12. По истечении компаунда из емкости 3 продолжать откачку ещё в течение 30 минут.

13. Выключить вакуумный агрегат.

14. Медленно открывая вентиль 6, напустить атмосферу в ёмкости 3 и 4.

15. Оставить полимеризоваться компаунд в течение 24 часов при температуре $18\pm 2^\circ\text{C}$.

16. Вынуть заливочную форму из ёмкости 4.

17. Разобрать форму.

18. Проверить катушку на электропрочность.

На рис. 5 показана готовая катушка.

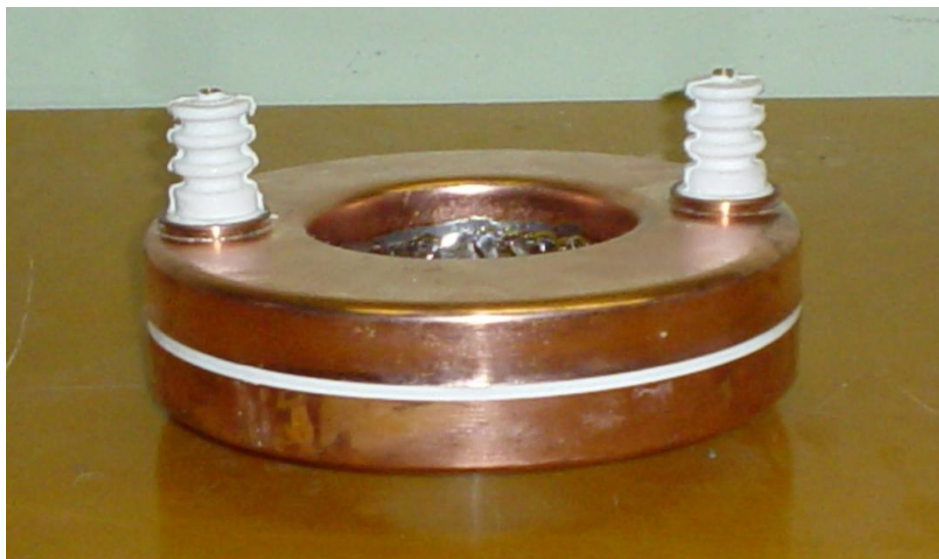


Рис. 5. Катушка.

8. Электрические испытания

Для проверки готовых изделий на электропрочность был разработан, изготовлен и откалиброван по киловольтметру типа С96 испытательный стенд, структурная схема которого представлена на рис. 6. Общий вид стенда представлен на рис. 7.

Стенд представляет собой маломощный высоковольтный источник постоянного отрицательного напряжения до 48 кВ. Этого напряжения достаточно для проверки электрической прочности катушек импульсных трансформаторов, проверка которых производится с 30% превышением максимального рабочего напряжения [3], что соответствует 42 кВ.

Установка работает от сети переменного тока ~220 В. Источник питания ИП установки выпрямляет напряжение питания до амплитудного значения 310 В, которое подается на генератор импульсов Г. Генератор Г вырабатывает короткие импульсы регулируемой регулятором Р амплитуды, поступающие далее на повышающий импульсный трансформатор ИТ. ИТ повышает амплитуду импульсов до 8 кВ; далее импульсы поступают на умножитель Умн, построенный по схеме Кокрофт-Уолтона [6], преобразующий импульсы в постоянное отрицательное напряжение до 48 кВ. Контроль напряжения (КН) осуществляется с помощью микроамперметра, включенного через делитель напряжения. 1 мкА микроамперметра соответствует 1 кВ на испытуемом изделии.

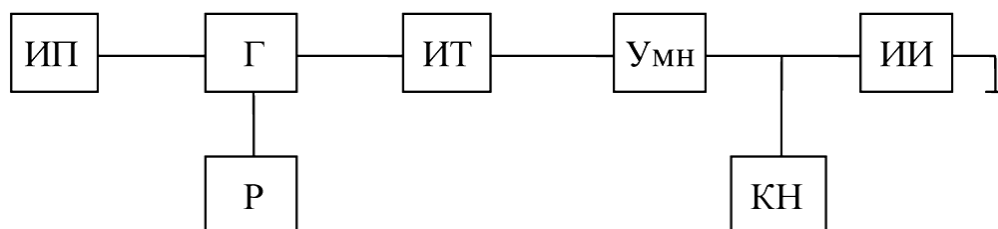


Рис. 6. Структурная схема испытательного стенда: ИП – источник питания; Г – генератор импульсов; Р – регулятор выходного напряжения; ИТ – повышающий импульсный трансформатор; Умн – Умножитель напряжения; КН – Схема контроля напряжения; ИИ – испытуемое изделие.

Стенд позволяет испытывать различные электроизоляционные материалы, что было использовано при входном контроле компаунда. Образцы из различных компаундов толщиной 1 мм помещались в стандартную масляную ванну и проверялись на электрическую прочность. Результаты испытаний ряда компаундов приведены в табл. 2.

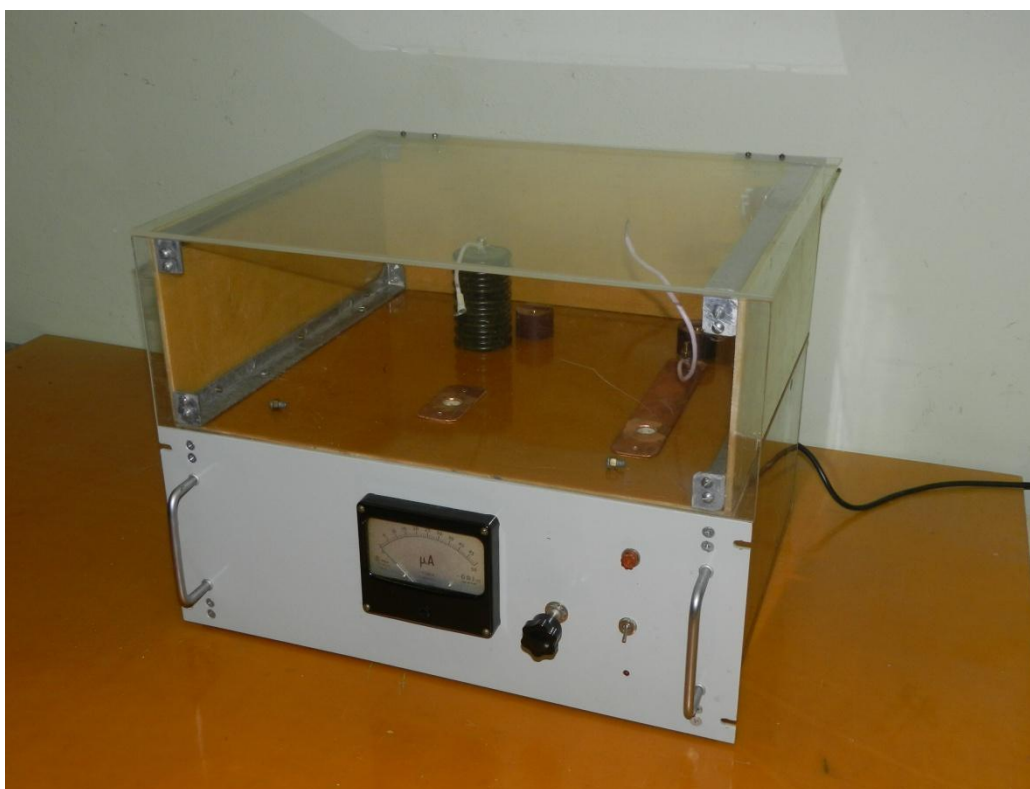


Рис. 7. Общий вид испытательного стенда.

Для испытания катушки на электропрочность ее выводы подключают к высоковольтному выводу стенда, экран заземляют, далее постепенно повышают напряжение до 42 кВ и выдерживают под этим напряжением в течение 1 мин.

Таблица 2

Компаунд	Электропрочность, кВ/мм
Эпоксидная смола ЭД-20	20 (по справочным данным 16)
Этал-50Э марки А	Напряжение пробоя не достигнуто (72 по справочным данным)
Этал-1471	Напряжение пробоя не достигнуто (50 по справочным данным)
Стиросил	30 (по справочным данным 30 – 35)

В случае возникновения пробоя напряжение снижают и некондиционное изделие бракуют. Пробой фиксируется по нарушению стабильности показаний микроамперметра. Электрическая прочность трансформатора в целом полностью определяется электрической прочностью компаунда.

Успешно выдержавшая испытание катушка передается дальше по технологической цепочке изготовления трансформатора: устанавливается изоляция между экраном и первичной обмоткой, наматывается первичная обмотка, устанавливаются выводы первичной обмотки. В итоге вся конструкция обматывается киперной лентой и пропитывается электроизоляционным лаком. На рис. 8 приведены готовые изделия – импульсные трансформаторы в стойке модулятора анодных напряжений.



Рис. 8. Импульсные трансформаторы в стойке модулятора: 1 – выводы первичной обмотки; 2 – внешняя изоляция; 3 – высоковольтные выводы (выводы вторичной обмотки).

9. Заключение

Импульсные трансформаторы модуляторов анодного напряжения в системе ВЧ-питания линейного ускорителя имеют специфические параметры и серийно не выпускаются.

В представленной работе рассмотрена конструкция сухого импульсного трансформатора с требуемыми параметрами, проведен выбор оптимального компаунда для заливки, описаны установки и методики заливки и электрических испытаний катушки трансформатора. Продемонстрирована возможность создания единичных экземпляров импульсных трансформаторов с заданными параметрами на лабораторном оборудовании, без привлечения значительных производственных мощностей.

Все изготовленные трансформаторы (8 шт.) успешно прошли цикл испытаний и эксплуатируются в модуляторе действующего линейного ускорителя более полутора лет.

Авторы благодарят А.В. Фёдорова и В.С. Сергеева, внесших большой вклад в разработку и изготовление установки вакуумной заливки и испытательного стенда.

Список литературы

- [1] Линейные ускорители ионов. Т. 2. Под ред. Б.П. Мурина. – М.: Атомиздат, 1978.
- [2] Мальцев И.Г., Седых В.М., Тепляков В.А. Модульная структура мощного импульсного модулятора для питания ВЧ-системы линейного ускорителя ионов. – Протвино, 1994.
- [3] А.Н. Воробьев, А.Ю. Евстифеев. Особенности построения мощного модульного импульсного модулятора для питания ВЧ-системы линейного ускорителя ионов. – Протвино, 2008.
- [4] Вдовин С.С. Проектирование импульсных трансформаторов. – Л.: «Энергоатомиздат», 1991.
- [5] Харпер Ч. Заливка электронного оборудования синтетическими смолами. М.-Л.: «Энергия», 1964.
- [6] Рогонский В.Ю. Электропитание радиоустройств. – М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1963.

Рукопись поступила 12 декабря 2011 г.

А.Н. Воробьев, А.Ю. Евстифеев

Импульсный трансформатор модулятора анодного напряжения системы ВЧ-питания
линейного ускорителя ионов (конструкция, технология изготовления, результаты испытаний).

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати 20.12.2011. Формат 60 × 84/16. Офсетная печать.
Печ.л. 1,2. Уч.- изд.л. 1,82. Тираж 80. Заказ 26. Индекс 3649.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2011-29, ИФВЭ, 2011
