

**МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)**

**С.Л.НЕДОСЕЕВ**

[nedos@triniti.ru](mailto:nedos@triniti.ru)

**СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ УСТАНОВОК ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ.  
ГЕНЕРАТОРЫ СВЕХТЕРАВАТТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ**

Учебно-методическое пособие для студентов IV курса Кафедры физики и химии плазмы  
ФМБФ МФТИ по лекционному курсу «Методы создания экспериментальных аппаратов»

Утверждено Кафедрой физики и химии плазмы

Москва

2004

# СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ УСТАНОВОК ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ. ГЕНЕРАТОРЫ СВЕХТЕРАВАТТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ

## Введение

Эксперименты в области физики плазмы и ее приложений относятся к категории наиболее энергонапряженных. Это определяется процессами энергопереноса в исследуемой среде – плазме. Действительно, плазма, как состояние вещества, характеризуется наибольшей энергией, приходящейся на одну частицу – от единиц эВ в низкотемпературной плазме, до десятков и даже сотен кэВ в высокотемпературной плазме при исследованиях в области управляемого термоядерного синтеза. Кроме того, при таких удельных энергиях велики скорости движения частиц, прежде всего, свободных электронов. Следовательно, велика теплопроводность плазмы и связанные с ней потери энергии из плазмы.

Для оценки, энергосодержание объема  $V$  плазмы с концентрацией ионов  $n$ , температурой  $T$ , можно записать в виде:  $E = (Z+1)nTV/(\gamma-1)$ , где  $\gamma$  -показатель адиабаты, а  $Z$  -заряд иона. Если обозначить характерное время остывания плазмы как  $\tau$ , уравнение энергобаланса можно представить в виде

$$dE/dt = -E/\tau + W,$$

где  $W$  – мощность нагрева плазменного объема. В стационарном режиме  $dE/dt=0$ , так что  $W \sim E/\tau$ . Оценим энергетику экспериментального аппарата, использующего магнитное удержание плазмы с параметрами, приближающимися к условию выполнения известного критерия Лоусона, который формулируется так:  $n\tau > 10^{14} \text{ см}^{-3}\text{с}$  при  $T \sim 10^4$  эВ для DT-плазмы. Пусть экспериментальным аппаратом будет тороидальная магнитная ловушка токамак с объёмом плазмы  $V=50 \cdot 10^6 \text{ см}^3$ , а характерное энергетическое время  $\tau \sim 0,5$  с. Это хороший экспериментальный аппарат. Получим мощность, необходимую для стационарного поддержания потребных параметров плазмы:

$$W \sim (Z+1)nTV/[(\gamma-1)\tau] = (Z+1)(n\tau) TV / [(\gamma-1)\tau^2].$$

Для термоядерной плазмы  $Z \sim 1$ ,  $\gamma \sim 1,7$ , так что получим  $W \sim 100$  МВт. Это «чистая» мощность нагрева, которая с помощью пучка нейтралов или методом высокочастотного нагрева должна вводиться в плазму для поддержания ее параметров на Лоусоновском уровне. Учитывая, что к.п.д. таких источников далек от 100% , понимаем, что для

реализации масштабного плазменного эксперимента на уровне осуществления физического термоядерного синтеза к экспериментальному аппарату нужно подсоединять стационарный генератор электрической мощности, сопоставимой с мощностью блока современной электростанции. В этом анализе мы не учитывали энергозатрат на создание тороидального и полоидального магнитного поля и на обеспечение функционирования множества вспомогательных агрегатов, обслуживающих эксперимент.

Другой пример - исследования по инерциальному термоядерному синтезу.

В соответствии с общей схемой термоядерной мишени, DT топливо помещается в сферическую капсулу, которая сжимается до колоссальных плотностей в  $\rho \sim 1000 \text{ г/см}^3$  за счет импульса давления, обеспечиваемого внешним источником энергии – драйвером.

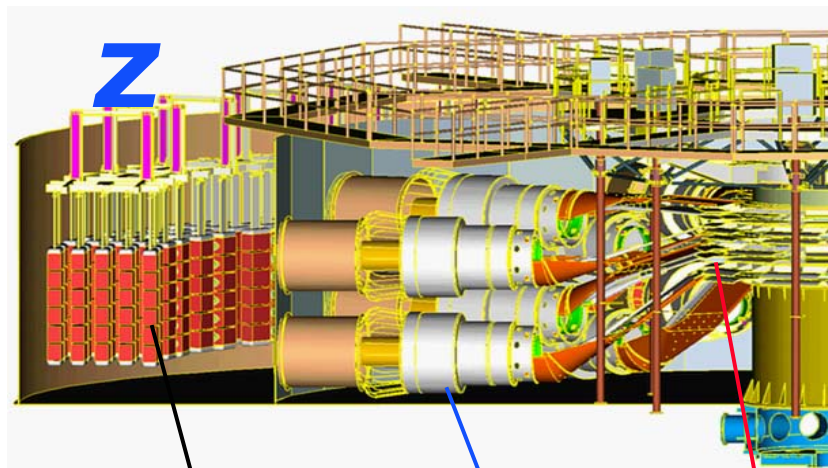
Оценим минимальную энергию, необходимую для инициирования термоядерного микровзрыва. Мы будем пользоваться простейшими представлениями, понимая, что в реальности задача много сложнее. Пусть имеем шарик из криогенной DT-смеси с радиусом  $R$ . Плотность твердой DT-смеси при криогенных температурах  $\rho_0 \sim 0,3 \text{ г/см}^3$ . Полагая, что зажигание термоядерного горения возможно, если  $\rho R \geq 0,3 \text{ г/см}^2$ , получим, что необходимый для этого размер шарика из замороженной DT-смеси  $R_0 \sim 1 \text{ см}$ . Предположим, что каким-то способом нам удалось мгновенно и объемно нагреть этот шарик, так что температура смеси достигла значения  $T \sim 10 \text{ кэВ}$ , а шарик еще не успел разлететься. Учитывая, что скорость разлета термоядерной взрывчатки при  $T \sim 10 \text{ кэВ}$  равна примерно  $V \sim 10^8 \text{ см/с}$ , получаем критерий мгновенности нагрева  $\tau_0 < R_0/V \sim 10 \text{ нс}$ .

Энергосодержание 1 грамма DT-смеси, в котором содержится примерно  $2,5 \cdot 10^{23}$  атомов, при термоядерной температуре составляет  $\varepsilon \sim 10^8 \text{ Дж/г}$ . В шаре с радиусом  $R$  из такого вещества содержится энергия  $E \sim (4/3)\pi R^3 \rho \varepsilon$ . Тогда для подрыва шарика из криогенной DT-смеси, потребуется  $E_0 > 100 \text{ МДж}$  энергии. Учитывая критерий мгновенности, получим требуемую мощность для этой цели  $W_0 \sim E_0/\tau_0 > 10^{16} \text{ Вт}$ . Как видим, требуемые значения величин  $E_0$  и  $W_0$  в совокупности далеко уходят за рамки возможного даже при самых оптимистических предположениях. Выход из создавшегося положения состоит в применении предварительного сжатия, имплозии, исходной DT-смеси. Сожмем шарик по радиусу в  $\xi = R_0/R$  раз, тогда его плотность возрастет в  $\xi^3$  раз. Вспомним условие зажигания  $\rho R = \rho_0 R_0 = \text{const} \sim 1 \text{ г/см}^2$ . После этого перепишем выражение для энергии инициирования следующим образом:

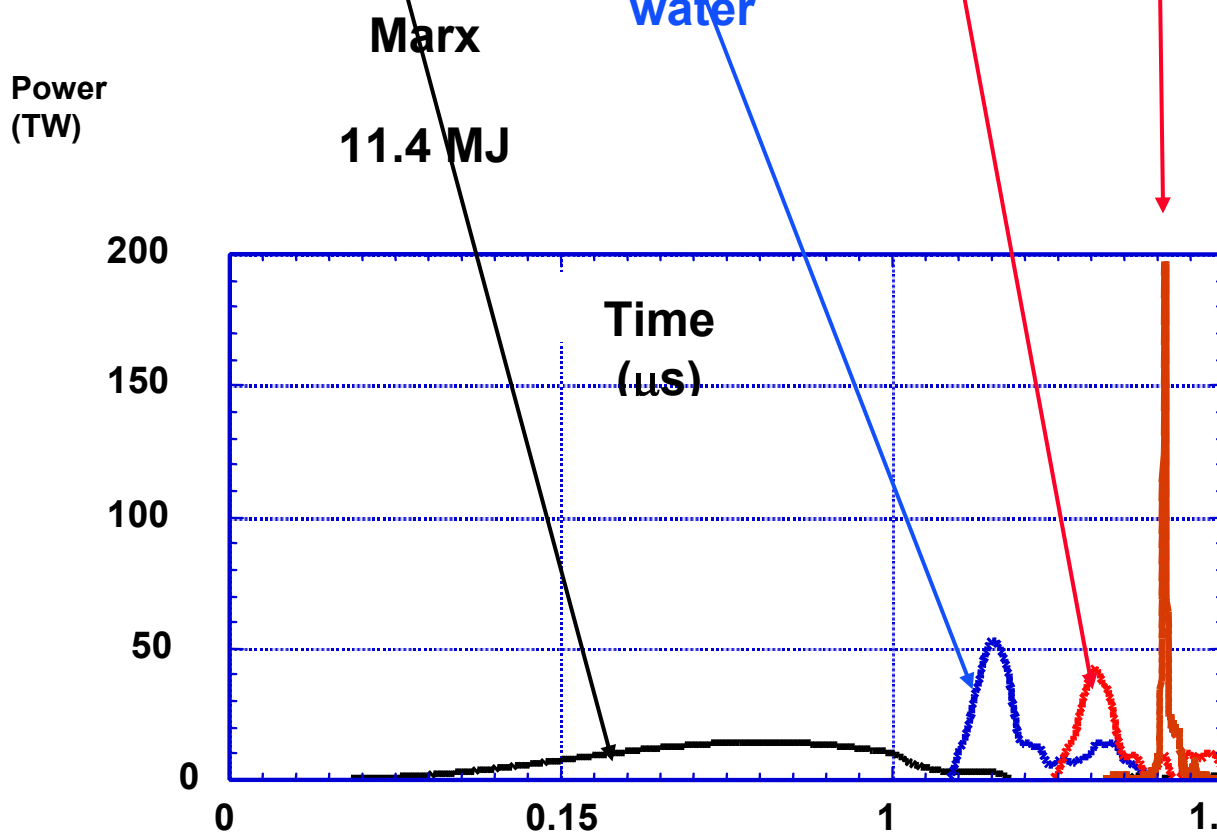
$$E \sim (4/3)\pi R^3 \rho \varepsilon = \varepsilon (4/3)\pi (\rho R)^3 / \rho^2 = \varepsilon (4/3)\pi (\rho_0 R_0)^3 / (\rho_0 \xi^3)^2 = E_0 / \xi^6$$

Как видим, предварительная имплозия термоядерной взрывчатки радикально изменяет ситуацию: достаточно сжать шарик из DT-смеси в  $\xi \sim 10$  раз по радиусу. Напомним, что это всего лишь иллюстрация. На практике все далеко не так просто и далеко не так эффективно, так что мощность драйвера на уровне 1000 ТВт, как минимум, потребуется. Вспоминая, что энергетика человечества характеризуется мощностью 10 ТВт, понимаем, что такой драйвер может быть только импульсным. Полагая длительность импульса драйвера порядка 200 нс, получим, что энергетика такого эксперимента достаточно скромна, всего  $\sim 200$  МДж

Вышеприведенные примеры показывают, насколько энергетически крупномасштабны серьезные плазменные эксперименты. В данном учебном пособии мы рассмотрим энергетику импульсного экспериментального аппарата для исследований в области инерциального термоядерного синтеза и ряда других приложений с драйвером, имеющим мегаджоульный уровень энергетика при сверхтераваттной мощности ее транспортировки. Для студентов кафедры физики и химии плазмы возможно участие в экспериментах на двух машинах подобного типа – «С-300» в РНЦ «Курчатовский институт» и «Ангара-5-1» в ГНЦ РФ ТРИНИТИ, г. Троицк, Моск. обл. Установка «Ангара-5-1» - крупнейшая в Евразии. Установка, крупнейшая в мире, называемая «Z», работает в Национальной лаборатории Сандия, США. Все эти аппараты работают по принципу каскадного накопления энергии и сокращения длительности разряда и переключения накопителей. На Рис. 1 схематически показано действие установки «Z».



x rays  
~1.8 MJ,  
~200 TW



- Modular
- High Efficiency (> 15% wall-plug to x-rays)
- Low cost (< \$30/J)
- Laser-triggered pressurized gas switches

Рис.1  
Схема установки "Z"



**Рис.2**

### **Схема установки «Ангара-5-1»**

#### **Состав и параметры установки «Ангара-5-1».**

Внешний вид установки показан на Рис.2. В состав установки входят генератор импульсной электрической мощности с системой высоковольтной синхронизации, вакуумная реакторная камера с концентратором мощности и сменными мишенными узлами, информационно - управляющий комплекс, комплекс физической диагностики, технологический комплекс, радиационная защита.

Генератор импульсной электрической мощности “Ангара-5-1” состоит из восьми модульных генераторов, включенных параллельно. Каждый модульный генератор содержит конденсаторный генератор импульсных напряжений, двойную формирующую линию с водяной изоляцией с пятью высоковольтными коммутаторами, предимпульсный разрядник, водяную коаксиальную передающую линию, водо - вакуумный интерфейс в виде изолирующей диафрагмы или кольцевой стековой ускорительной трубки.

Реальные параметры восьмимодульного генератора установки “Ангара-5-1”:

Максимальное напряжение на согласованной нагрузке - 1,5 МВ.

Форма импульса напряжения - полусинусоида с полупериодом 150 нс.

Волновое сопротивление генератора - 0,25 Ом.

Максимальный ток в согласованной нагрузке - 6 МА

Среднеквадратичный разброс времени срабатывания модулей - ~ 15 нс.

Вакуумная реакторная камера диаметром ~2,5 м, высотой ~2,5 м имеет 8 равнорасположенных вводов для горизонтальных коаксиальных транспортирующих линий от модульных генераторов. Для транспортировки и концентрации импульсной энергии на нагрузку в камере применен многоканальный концентратор с магнитной самоизоляцией. Сложение токов от генераторов происходит в вакууме. Коллектор токов и мишенный узел имеют вертикальную ось симметрии. Реакторная камера откачивается паромасляными вакуумными насосами с общей производительностью около 20000 л/с. Предельный вакуум в камере  $10^{-5}$  торр. Смена мишенных узлов производится после каждого выстрела, минимальный интервал между выстрелами ~ 1,5 часа. Реакторная камера снабжена большим количеством диагностических патрубков. Бетонная биологическая защита обеспечивает радиационную безопасность персонала при всех режимах работы установки.

Установка снабжена автоматизированным многоканальным комплексом сбора измерительной информации, эффективно защищенным от импульсных электромагнитных помех. В стандартный набор методик электрофизической диагностики входят помодульные многоточечные измерения электрических параметров импульсов от генераторов, измерения полных токов и напряжения на мишенном узле. В набор физических диагностик установки входят измерения параметров ВУФ, мягкого и жесткого рентгеновского излучения исследуемых плазменных объектов с помощью вакуумных камер - обскур, вакуумных рентгеновских диодов с фильтрами, кадровых



рентгеновских электронно - оптических преобразователей, кристаллических спектрографов, многоканальных полупроводниковых и сцинтилляционных датчиков, рентгеновских радиационных калориметров, рентгеновского полихроматора, щелевых рентгеновских разверток. В экспериментах с дейтериевой плазмой использован комплекс нейтронной диагностики. В оптическом диапазоне производится активное зондирование плазмы трехканальным импульсом рубинового лазера с получением теневых изображений или интерферограмм, позволяющих определять пространственное распределение плотности ускоряемой плазмы. В этом диапазоне применяются также щелевые развертки и мгновенное фотографирование с помощью ЭОП.

### **Концентратор мощности с вакуумной магнитной самоизоляцией.**

В первоначальном варианте силовая часть установки “Ангара-5” проектировалась как сборка из 48 модульных генераторов тераваттной мощности, работающих независимо друг от друга при жесткой внешней синхронизации их включения. В том проекте каждый модульный генератор работал на свою нагрузку - сильноточный вакуумный диод и энергия подводилась к мишени в виде 48 РЭП, объединяющихся только в непосредственной близости от мишени (в ловушке со встречными магнитными полями, например)

Реализация первой очереди установки, получившая наименование “Ангара-5-1”, включает 8 модульных генераторов и нагрузку в виде лайнера или Z-пинча, переход на которую подразумевал замену РЭП на импульсы тока. Следовательно, потребовалось сложение токов от отдельных модулей в одном общем коллекторе, то есть, между модульными генераторами и нагрузкой возникла гальваническая связь. Это повлекло за собой принципиальные изменения в схеме транспортировки энергии от модульных генераторов к нагрузке: для сжатия лайнеров и Z-пинчей ток к ним необходимо подводить по электродам. Так как суммарная расчетная мощность 8 модульных генераторов составляла 9 ТВт при токе  $\sim 5-6$  МА, амплитуда импульса выходного напряжения должна быть на уровне 1,5 МВ.

Волновое сопротивление восьмимодульного генератора  $\rho = 0,25$  Ом. Характерный импеданс нагрузки генератора, согласованный на максимум передачи мощности, должен быть примерно такой же величины. Лайнер, Z-пинч и другие физические нагрузки реально представляют собой нелинейные комплексные импедансы  $Z$ , параметры которых сильно варьируются в зависимости от физической задачи. Для оценки  $Z \sim \rho$  примем, что импеданс  $Z$  представляет собой индуктивность, величина ее  $L$  будет оцениваться как  $L \sim \rho \tau$ , где  $\tau$  - характерная длительность нарастания тока генератора. Полагая  $\tau \sim 100$  нс,



получим оценку для индуктивности  $L \sim 25$  наногенри. Естественно, что индуктивность токоподводов к нагрузке должна составлять по возможности малую величину от  $L$ .

Ниже будет показано, что в вакууме доставить на нагрузку  $Z$  импульс напряжения величиной  $1 - 1,5$  МВ, используя для этого подводящую линию с индуктивностью  $L \sim 10-20$  нГн, можно только применяя в ней магнитную самоизоляцию токонесущих проводников с малыми,  $\leq 1$  см, зазорами между ними. Поэтому мы предварим изложение физико - технических параметров реальной системы транспортировки и концентрации электромагнитной мощности установки “Ангара-5-1” кратким описанием свойств вакуумной магнитной самоизоляции.

### **Принципы магнитной самоизоляции.**

#### **Условие существования магнитной самоизоляции.**

Пусть имеется двухпроводная линия в вакууме, по которой напряжение  $U$  передается от генератора к нагрузке. При достижении напряженности электрического поля на поверхности проводника в вакууме величины  $\sim 0,1 - 1$  МВ/см происходит взрывная эмиссия электронов с отрицательного электрода линии, в зазоре “катод - анод” возникает электронный ток утечки и тем самым нарушается вакуумная изоляция зазора. Но если по линии течет ток  $I$ , то в междуэлектродном зазоре возникает магнитное поле. Тогда электроны могут дрейфовать в скрещенных электрическом и магнитном полях, описывая в зазоре циклоидальную траекторию, и при определенных условиях их траектории не будут достигать анодного электрода - наступит магнитная самоизоляция зазора.

Полагая для определенности магнитно изолированную вакуумную транспортирующую линию (МИВТЛ) коаксиальной с радиусами внутреннего и внешнего электродов  $r_i$  и  $r_e$ , соответственно, получим простейшее условие такой самоизоляции в одночастичном приближении:

$$\frac{2eI}{mc^2} \ln \frac{r_e}{r_i} > \sqrt{(1 + eU / mc^2)^2 - 1}$$

Для электронного слоя, заполняющего весь зазор, минимальный ток, при котором наступит самоизоляция, будет так называемый парapotенциальный ток, кА:

$$I_{\min} = \frac{8,5}{\ln(r_e / r_i)} \gamma \ln(\gamma + \sqrt{\gamma^2 - 1}),$$

где  $\gamma$ - релятивистский фактор  $\gamma = 1 + eU/mc^2$ .

Таким образом, для осуществления магнитной самоизоляции проводников через них должен протекать ток, превышающий минимальный. Оценим, для примера,  $I_{\min}$  для

линии с радиусом  $r_e = 15$  см и зазором  $r_e - r_i = 2$  см, на которую подан импульс напряжения 1 МВ, то есть,  $\gamma = 3$ . Получим  $I_{\min} \sim 360$  кА.

### **Режим установления магнитной самоизоляции.**

В разомкнутой вакуумной линии весь ток будет протекать в виде утечек на конце, занимая область длиной в несколько междуэлектродных зазоров. Если линия нагружена на некоторое сопротивление  $R_n$ , то часть тока линии  $I_n$  будет протекать через нагрузку, а при  $I_n > I_{\min}$  в линии установится магнитная самоизоляция и на нагрузку переключится весь ток. Для индуктивной нагрузки в начале импульса напряжения на ней ее импеданс велик:  $R_n = L_n (dI_n / dt) / I_n$ , так что линия является фактически разомкнутой, ток через нагрузку мал и он практически весь определяется утечками. С течением времени импеданс индуктивной нагрузки стремится к нулю, так как  $dI_n / dt \rightarrow 0$ , утечки прекращаются и весь ток замыкается через индуктивность. Физические нагрузки, как правило, нестационарны, поэтому учет процессов переключения токов необходим. Для примера рассмотрим эффективность передачи энергии по МИВТЛ к нестационарной индуктивной нагрузке - лайнеру. Для определения тока и напряжения на линии применяются телеграфные уравнения, которые при учете собственной индуктивности МИВТЛ сводятся к одному,

$$L \frac{\partial I_{\min}(U)}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial z} = 0,$$

в котором  $z$ - координата, вдоль которой распространяется волна магнитной самоизоляции. Это уравнение совместно с граничными условиями на входе и выходе МИВТЛ позволяет определить ее электродинамические характеристики. Задача может быть решена численно. Из результатов расчетов следует, что электронные утечки в МИВТЛ существуют на фронте импульса и прекращаются к  $\sim 60$  нс. Они приводят к потерям в кинетической энергии лайнера и в токе через него  $\sim 10\%$ . Конечно, при резком возрастании импеданса лайнера вновь возможно появление утечек в подводящей МИВТЛ. Отметим, что эти расчеты не учитывали роль плазмы, возникающей на электродах и способной перекоротить междуэлектродный зазор.

### **Работа неоднородной МИВТЛ.**

В реальных конструкциях систем транспортировки и концентрации электрической мощности МИВТЛ всегда пространственно неоднородны.. Как показали расчеты, до и после неоднородного участка в МИВТЛ протекает минимальный ток, вычисленный по локальному  $\rho$ . Их разность стекает в виде тока утечки в области неоднородности, причем

в первом случае ток утечки сосредоточен на длине порядка нескольких зазоров, во втором он распределен по всей длине перехода.

### **Особенности магнитной самоизоляции концентратора токов от многомодульного генератора.**

В ряде случаев, например, в случае “Ангары-5-1”, генераторы сверхвысокой электрической мощности строятся по многомодульному принципу, причем для увеличения суммарного тока они подключаются к нагрузке параллельно. Такое соединение с использованием МИВТЛ может оказать существенное влияние на их магнитную самоизоляцию из-за возможной несинхронности срабатывания модульных генераторов. С появлением на нагрузке напряжения, созданного пришедшими импульсами от уже сработавших генераторов, в МИВТЛ отставшего модульного генератора будут распространяться две встречных волны магнитной самоизоляции- одна от генератора, другая - от нагрузки, причем ток в этой волне будет иметь направление, противоположное току волны от генератора. В результате встречи этих волн где-то в МИВТЛ отставшего модуля образуется область с нулевым магнитным полем, в которой токи обеих волн замыкаются в виде тока утечки, и ток отставшего генератора не попадает в нагрузку. Эффект усугубляется тем, что зона утечки становится местом повышенного энерговклада, который может привести к появлению плотной плазмы на анодном электроде МИВТЛ и полной закоротке линии.

Были выполнены расчеты уже существующей системы концентратора “Ангары-5-1” состоящей из восьми идентичных модулей, работающих на омическую нагрузку 0,3 Ом. Каждый модуль представлял собой генератор с волновым сопротивлением 2 Ом, который через индуктивность 100 нГн подсоединялся к МИВТЛ длиной 160 см и волновым сопротивлением 4 Ом. Генераторы выдавали полусинусоидальные импульсы э.д.с. 2,4 МВ с длительностью по основанию 140 нс. Времена начала каждого импульса распределены по нормальному закону со среднеквадратичной дисперсией  $\sigma$ . Выбирая последовательность из 8 случайных чисел, определяли время срабатывания каждого из восьми модулей и рассчитывали величину энерговклада в нагрузку. Повторяя процедуру многократно, находили среднюю величину энерговклада и среднеквадратичное отклонение от нее. Усреднение проводилось по десяти последовательностям времен срабатывания для каждого из значений  $\sigma = 5, 10, 15, 20$  нс. Как показали расчеты, среднеквадратичный разброс  $\sigma = 20$  нс уже приводит к серьезным уменьшениям энерговклада в нагрузку (~35%).

## **Практические схемы и физико - технические параметры концентраторов**

### **Концентратор установки “Z”**

В системе “Z” (см. Рис.1) имеется общий бассейн, где размещены модульные генераторы с водяной изоляцией, и токи от модульных генераторов собираются на общий коллектор, расположенный в воде. Внутри вакуумной реакторной камеры суммированный импульс тока подается по коническим электродам с большим углом раствора, как показано на Рис.3. Конические электроды изолированы друг от друга кольцевыми изоляторами, диаметр которых равен диаметру вакуумной реакторной камеры (ВРК). В вакууме между коническими электродами устанавливается магнитная самоизоляция. Для уменьшения полной индуктивности вакуумного тракта использованы 4 конических МИВТЛ. Они включены параллельно, а для переключения всей системы на двухэлектродный диод - лайнерный узел используется трехмерная конволюция. Технически она исполнена в виде нескольких азимутально равномерно расположенных штырей, соединяющих 4 заземленных конических электрода и пронизывающих два высоковольтных конических электрода, которые тоже соединены между собой. Конволюция устроена вблизи лайнерного узла. Серьезным техническим усложнением топологии концентратора “Z” является необходимость применения разделительных изоляторов в виде колец большого диаметра. Для “Z” они имели диаметр около 3 м.

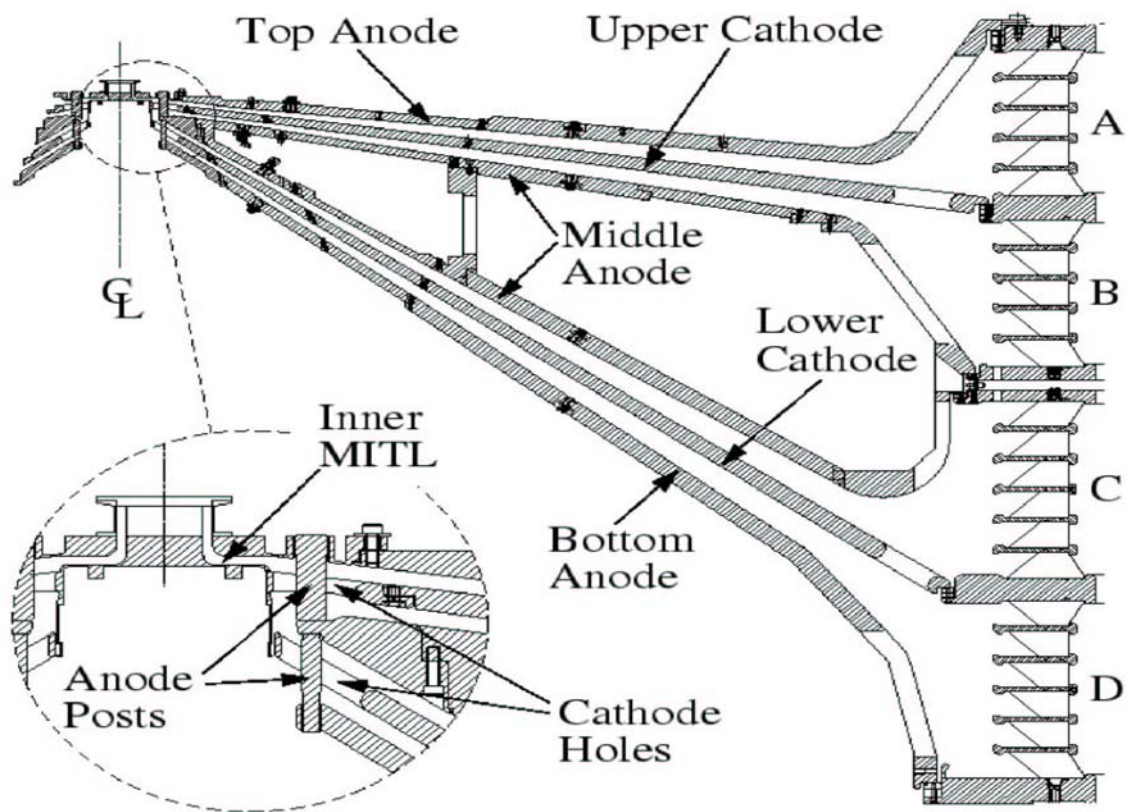


Рис.3

Схема концентратора тока установки «Z»

## **Топологическая схема концентраторов установки “Ангара-5-1”**

Особенностью концентратора “Ангара-5-1” является наличие отдельных вакуумных вводов энергии от каждого из модульных генераторов и суммирование токов на общем коллекторе, находящемся в вакууме. Каждый вакуумный ввод энергии начинается от водо-вакуумного интерфейса - изолятора, отделяющего коаксиальную передающую линию (ПЛ) с водяной изоляцией соответствующего модульного генератора от вакуумного участка транспортировки, и соединяется со своей МИВТЛ. Каждая МИВТЛ имеет вид длинного коаксиального кабеля с вакуумным зазором (1 - 3 см), малым по сравнению с радиусом (15 см). Оси всех восьми коаксиальных МИВТЛ горизонтальны и ориентированы на общую вертикальную ось симметрии концентратора мощности (КМ). По этой причине в каждой МИВТЛ необходима топологическая конволюция - переход с коаксиальной геометрии на плоскую, ориентированную так, чтобы стало возможным подсоединение МИВТЛ к электродам коллектора, имеющего вертикальную ось симметрии. В КМ установки “Ангара-5-1” были исследованы и применялись в экспериментах с физическими нагрузками различные варианты конволюции и коллектора, но топологическая схема сложения тока в вакууме оставалась неизменной.

По сравнению со схемой сложения токов в воде вне рабочей камеры, применяемой на “Z”, схема «А-5-1», приспособленная для полностью автономных модульных генераторов, позволяет применять водо - вакуумные разделительные изоляторы существенно меньшего диаметра, что значительно упрощает технологические и эксплуатационные проблемы. В то же время возникает новая, принципиальная для ее топологии, проблема: в зоне конволюции МИВТЛ и их подсоединения к коллектору на биссектрисах углов между вводами образуются области нулевого магнитного поля. Таким образом, при сложении радиально направленных пространственно дискретных токов, независимо от величины складываемых токов и их синхронизации, между ними всегда есть зоны, в которых магнитная самоизоляция отсутствует. Естественно, что в этих зонах будут электронные утечки, что может снизить и даже свести на нет эффективность транспортировки и концентрации на физическую нагрузку импульсной мощности от многомодульного генератора.

Количественная теория, позволяющая определить величины токов утечек в сложной трехмерной геометрии конволюций и коллектора токов отсутствует. Поэтому технические решения при создании концентратора принимались, исходя из следующего общего принципа, вообще говоря, теоретически не доказанного. В соответствии с законом Чайлда - Ленгмюра плотность электронного тока утечки обратно пропорциональна

квадрату расстояния между электродами. Следовательно, в зонах с нулевыми и малыми магнитными полями расстояние между электродами должно быть по возможности большим. При этом индуктивность всего концентратора мощности (КМ), определяемая величинами междуэлектродных зазоров, должна быть малой. Вывод: места конволюции и стыковки МИВТЛ с коллектором токов должны находиться на возможно большем расстоянии от вертикальной оси симметрии КМ, то есть, коллектор должен быть возможно большего диаметра, дисковым. Наряду с другими вариантами, дисковый вариант КМ был создан и успешно использован на “Ангаре-5-1” в самых разных экспериментальных условиях, хотя индуктивность его не самая минимальная из возможных.

### **Концентратор как магнитный накопитель.**

#### **Накачка магнитной энергии в концентратор с нагрузкой - лайнером.**

В вакуумном тракте транспортировки и концентрации мощности осуществление магнитной самоизоляции достигается ценой энергозатрат на создание магнитного поля в зазоре между токонесущими электродами. Физические требования для осуществления магнитной самоизоляции рассмотрены в предыдущих разделах. Их суть сводится к условию, чтобы траектория электрона, покинувшего катодный электрод ВТЛ, нигде на пути дрейфа к нагрузке в зазоре катод - анод, в скрещенных электрическом и магнитном полях, не касалась анода. Грубо говоря, это условие можно всегда осуществить, увеличением величины зазора катод - анод, которое к тому же снижает напряженность электрического поля в нем. Но при этом возрастает индуктивность МИВТЛ,  $L_{\text{ВТЛ}}$ , и, следовательно, растут энергетические затраты на осуществление магнитной самоизоляции током, текущим через физическую нагрузку.

Физической нагрузкой могут быть различные объекты, в том числе : сильноточные электронный и ионный диоды, быстросжимающиеся лайнеры и Z-пинчи, другие плазменные объекты. Все они с электротехнической точки зрения характеризуются значительной нелинейностью и нестационарностью индуктивной и активной составляющих импеданса. Поэтому работа электрической цепи “генератор - концентратор - нагрузка” совершенно различна на различных стадиях процесса и при разных нагрузках.

Конкретизируя задачу, будем считать, что нагрузкой является плазменный лайнер, который с электротехнической точки зрения будет рассматриваться как цилиндрическая плазменная оболочка длиной  $h$  с радиусом  $r(t)$ , линейной массой  $M$ , радиально сжимаемая силой  $[jH]$ , где  $j$  и  $H$  - соответственно, локальные значения плотности тока и



напряженности магнитного поля тока, текущего через оболочку,  $I = \int 2\pi j r dr$ . Генератор с внутренним сопротивлением  $\rho$  развивает импульс э.д.с.  $E(t)$ , длящийся в течение времени  $T$ . Электрическая цепь воспринимает движущийся со скоростью  $v(t)$  плазменный лайнер как элемент, в котором напряжение  $V(t)$  и  $I(t)$  ток связаны выражением:

$$V(t) = d(LI)/dt + \Omega I,$$

где  $L$  - индуктивность, а  $\Omega$  - омическое сопротивление лайнера. Сумма  $\{dL/dt + \Omega\} = Z_{\text{акт}}$  является активной составляющей импеданса нагрузки - движущегося лайнера. Полное уравнение для токовой цепи "генератор - концентратор - нагрузка", следовательно, будет:

$$2E - \rho I - L_{\text{вгл}} dI/dt - Z_{\text{акт}} I = 0$$

Простые оценки иллюстрируют временные характеристики  $Z_{\text{акт}}$  для лайнера. Свяжем  $dL/dt$  с механическими параметрами движущегося лайнера. Для этого ускорение тонкого, хорошо проводящего ( $\Omega = 0$ ) лайнера с линейной массой  $M$  представим в виде

$$dv/dt = (-10^{-2}/M)(I^2/r),$$

$$[I] = \text{А}, [M] = \text{г/см}, [r] = \text{см};$$

тем самым будем считать, что тонкий токовый слой радиально сжимается вместе с веществом лайнера. Как видим, ускорение пропорционально квадрату тока  $I$  и степени сжатия  $\xi = r_0 / r$ , где  $r_0$  - начальный радиус лайнера, то есть, оно наиболее велико на конечном этапе процесса, если стремиться к тому, чтобы лайнер "схлопнулся" вблизи максимума тока:  $r \rightarrow 0$  при  $I \rightarrow I_{\text{max}}$ . В соответствии с этим, величина  $dL/dt$ , оставаясь относительно малой в течение почти всего времени нарастания тока, круто возрастает в момент непосредственно перед схлопыванием. Действительно, индуктивность цилиндрического лайнера в коаксиальной токнесущей системе  $L = 2h \ln(R/r)$ , где  $R$  - радиус обратного токопровода, так что  $dL/dt = 2h (v/r)$ . Отношение  $v/r$  перед схлопыванием нарастает во времени очень быстро, следовательно, допустимо следующее приближение поэтапной работы цепи:

*Первый этап* - происходит накачка магнитной энергии от генератора в индуктивность  $L_{\text{вгл}}$  при практически неподвижном лайнере, то есть,  $dL/dt \sim 0$  и уравнение цепи  $2E - \rho I - L_{\text{вгл}} dI/dt = 0$ .

*Второй этап* - накачка магнитной энергии закончилась,  $E(t) \sim 0$ , включается быстрое схлопывание лайнера, часть магнитной энергии, накопленной в  $L_{\text{вгл}}$ , расходуется на его ускорение. Уравнение цепи превращается в:

$$(\rho + Z_{\text{акт}})I = -L_{\text{вгл}} dI/dt,$$

запасенный ток спадает и  $dI/dt < 0$ . Обратим внимание на возможность ухода энергии обратно в генератор, когда его волновое сопротивление  $\rho$  не мало по сравнению с

импедансом  $Z_{акт}$ , который определяется физическими процессами в нагрузке. Подбирая параметры лайнера так, чтобы осуществить быстрое сжатие лайнера вблизи максимума тока, мы тем самым стремимся наиболее рационально использовать запасенную магнитную энергию. Если в цепи в результате накачки запасена магнитная энергия  $E_h = 0,5 L_{вгл} I_m^2$  и при сжатии лайнера сохраняется магнитный поток, то есть,  $L_{вгл} I_m = L(t) I(t) = const$ , ( $\rho$  и  $\Omega$  - малы), то мощность потерь магнитной энергии  $W_h = -dE_h/dt = 0,5 I^2 dL/dt$  характеризует работу, которую совершает сила  $[jH]$ , сжимая токовую оболочку, то есть, работая против сил инерции ускоряемой массы, против сил термодинамического давления сжимаемой плазмы и т.д.

Величина  $Z_{акт}$  должна быть как можно большей с учетом того, что характерное время диссипации магнитной энергии, запасенной в индуктивности  $L_{вгл}$ , равно

$$t_{дис} = L_{вгл} / (Z_{акт} + \rho),$$

так что время включения  $Z_{акт}$ , определяемое физическими процессами в нагрузке, должно быть существенно меньше  $t_{дис}$ .

Произведем некоторые количественные оценки для набора параметров, характерных для "Ангары-5-1".

*Накачка магнитной энергии.* Если предположить, что накачка магнитной энергии в концентратор происходит при постоянном значении индуктивности  $L_{вгл}$ , равной индуктивности тракта от ВВИ до внешней поверхности лайнера на начальном радиусе  $r_0$ , и принять, что генератор с двойной формирующей линией развивает полусинусоидальный импульс э.д.с.  $E = E_m \sin(\pi t / T)$ , то, решая уравнение  $2E - \rho I - L_{вгл} dI/dt = 0$ , можно получить временные зависимости тока и мощности накачки. В Таблице для  $L_{вгл} = 10, 15, 20$  и  $30$  нГн приводятся максимумы  $W$  и  $I$ , а также максимум закачанной магнитной энергии  $\max(E_h) = 0,5 L_{вгл} I_{max}^2$  [кДж], который, естественно, совпадает по времени с максимумом тока.

Таблица

$L_{вгл}$ , нГн	$I$ , МА	$W$ , ТВт	$\max(E_h)$ , кДж
10	6,40	3,74	205
15	5,55	3,99	231
20	4,87	3,95	237
30	3,90	3,62	228

Видно, что максимум тока падает от 6,4 МА до 3,9 МА при увеличении  $L$  от 10 до 30 нГн, в то время как мощность накачки и запасенная магнитная энергия максимальны при  $L_{вгл} \sim 20$  нГн, составляя примерно 4 ТВт и 237 кДж, соответственно. Мощность накачки

приходит в ноль при выходе тока на максимум, затем магнитная энергия начинает уходить обратно в генератор.

Не проводя аналитического рассмотрения, можно считать, что оптимальное значение индуктивности  $L_{вгл}$ , при котором максимальны параметры накачки магнитной энергии  $W$  и  $E_h$ , для полусинусоидального импульса э.д.с. связано с внутренним сопротивлением генератора  $\rho$  соотношением  $L_{опт} \sim \theta\rho T$ , где множитель  $\theta \sim 0,5-0,6$ . Его значение получено из условия, что для “Ангары-5-1”  $L_{опт} \sim 20$  нГн ( $\rho = 0,25$  Ом,  $T = 150$  нс). Для наиболее мощной машины аналогичного типа “Z” ( $\rho = 0,12$  Ом,  $T \sim 200$  нс) наш расчет дает  $L_{опт} = 10 - 12$  нГн, что соответствует реально полученному на этой установке значению  $L_{вгл} = 12$  нГн.

### **Мощность диссипации магнитной энергии.**

Цилиндрическая, хорошо проводящая ( $\Omega=0$ ), тонкая токовая оболочка длиной  $h$  [см], радиусом  $r$  [см], радиально сжимаемая со скоростью  $v$  [см/с], вносит в электрическую цепь активный импеданс  $Z_{акт} = 10^{-9} dL/dt = 2 \cdot 10^{-9} hv/r$  [Ом]. При  $h=2$  см,  $v = 5 \cdot 10^7$  см/с,  $r = 0,1$  см имеем  $Z_{акт} = 2,0$  Ом  $\gg \rho = 0,25$  Ом, что дает  $t_{дис} \sim 10$  нс. За такое время диссипации магнитной энергии в нагрузку вводилась бы активная мощность порядка 10 ТВт, что в 2 - 3 раза превысило бы максимум мощности накачки магнитной энергии, развиваемой генератором “Ангары-5-1”. Отметим, что мощность порядка 6 ТВт достигнута в экспериментах по сжатию лайнеров на основе многопроволочных сборок.