

Научно-исследовательское учреждение
Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН

М. Е. Вейс, С. Н. Фадеев, Н. К. Куксанов, П. И. Немытов,
В. В. Прудников, Р. А. Салимов, С. Ю. Таскаев

СТАБИЛИЗАЦИЯ УСКОРЯЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ В
ВЫСОКОВОЛЬТНОМ УСКОРИТЕЛЕ-ТАНДЕМЕ ДЛЯ
НЕЙТРОНОЗАХВАТНОЙ ТЕРАПИИ

ИЯФ 2002-17

Новосибирск
2002

Стабилизация ускоряющего напряжения в высоковольтном ускорителе-тандеме для нейтронозахватной терапии

*М. Е. Вейс, С. Н. Фадеев, Н. К. Куksанов, П. И. Немытов,
В. В. Прудников, Р. А. Салимов, С. Ю. Таскаев*

Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН,
Новосибирск, Россия

В ИЯФ разрабатывается электростатический ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией. Одной из составных частей ускорителя является источник ускоряющего напряжения.

В представленной работе рассматривается система стабилизации выходного напряжения высоковольтного источника с выходным напряжением до 1,5 МВ и мощностью до 100 кВт. Источник выполнен на основе каскадного генератора с индуктивной связью и параллельным питанием каскадов и предназначен для создания ускоряющего напряжения в ускорителе-тандеме для нейтронозахватной терапии. Приведены оценки пульсаций выходного напряжения, предлагаются способы их подавления.

Stabilization of accelerating voltage at high-voltage tandem accelerator for neutron capture therapy

*M. Veis, S. Fadeev, N. Kuksanov, P. Nemytov, V. Prudnikov,
R. Salimov and S. Taskaev*

Budker Institute of Nuclear Physics, SB RAS,
Novosibirsk, Russia

An electrostatic tandem accelerator with vacuum insulation is under developed at BINP now. Source of accelerating voltage is one of the component of the accelerator.

In this paper, a system of output voltage stabilization is considered for high-voltage source with an output voltage up to 1.5 MV and a power up to 100 kW. The source is based on cascade generator with inductive coupling and parallel feeding of stages and is intended to provide accelerating voltage in tandem accelerator for neutron capture therapy. Ripple of output voltage are estimated and methods for its suppression are proposed.

Введение

В настоящее время в ИЯФ СО РАН для лечения злокачественных опухолей в условиях специализированных клиник разрабатывается комплекс для бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ) [1]. Для этой цели предлагается источник нейтронов на основе ускорителя. Пучок отрицательных ионов водорода инжектируется в электростатический ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией. Ускорившись до полного напряжения, этот пучок попадает в перезарядную газовую мишень, где отрицательные ионы превращаются в протоны. Далее протонный пучок вновь ускоряется и на выходе ускорителя-тандема имеет энергию, равную удвоенной величине ускоряющего напряжения. При сбросе протонного пучка на литиевую мишень в результате пороговой реакции ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ генерируется поток нейтронов.

Предполагаются два возможных варианта использования (два различных режима работы) нейтронного источника: терапия быстрыми нейтронами и нейтронозахватная терапия. Наиболее привлекательной является бор-нейтронозахватная терапия, когда опухоль, в которой селективно накапливается заранее вводимый с помощью специальных препаратов стабильный изотоп бора ${}^{10}\text{B}$, облучается потоком тепловых нейтронов. В результате поглощения энергетичные α -частица и ион ${}^7\text{Li}$ быстро тормозятся на длине размера клетки и выделяют энергию $\sim 2,3$ МэВ в пределах именно той клетки, которая содержала ядро бора, что приводит к избирательному поражению опухоли. Поток тепловых нейтронов с хорошей направленностью вперед формируется при энергии протонов, на 10 – 20 кэВ превышающей порог реакции ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 1,881 МэВ. В другом режиме (для терапии быстрыми нейтронами) энергия протонов должна быть 2,5 МэВ, максимум спектра смещается до энергии 790 кэВ (необходимой для терапии быстрыми нейтронами), а направленность пучка обеспечивается с помощью коллиматоров. В то же время с помощью коллиматоров и замедлителей из этого пучка можно сформировать пучок нейтронов, пригодный и для нейтронозахватной терапии.

Таким образом, источник ускоряющего напряжения должен иметь выходное напряжение равное половине энергии протонов и, в зависимости от режима работы нейтронного генератора, это напряжение должно быть 0,94 МВ или 1,25 МВ.

Ток нагрузки выпрямителя равен удвоенному току протонного пучка, величина которого определяется исходя из требований разумного времени экспозиции (около десяти минут) для получения необходимой терапевтической дозы (примерно 20 Гр).

В качестве максимальной величины тока протонного пучка в комплексе для нейтронной терапии фигурируют цифры 20 – 40 мА [1], т.е. максимальный ток, потребляемый от источника, равен 80 мА.

Таким требованиям удовлетворяет высоковольтный секционированный выпрямитель, созданный на базе источника ускоряющего напряжения для ускорителя ЭЛВ-4, максимальное напряжение которого 1,5 МВ [2]. Помимо того, что этот источник высокого напряжения обеспечивает необходимые параметры: напряжение и мощность, привлекательным является его высокая надежность, подтверждаемая многолетней эксплуатацией многих десятков ускорителей ЭЛВ, в которых используются подобные источники высокого напряжения, на промышленных предприятиях и в исследовательских центрах.

Конструкция высоковольтного выпрямителя

Источником высокого напряжения в ускорителях электронов типа ЭЛВ [2] и в некоторых типах ионных ускорителей, также как и в проекте бор-нейтронзахватной терапии, служит каскадный генератор с индуктивной связью и параллельным питанием каскадов.

Внутри котла, заполненного изолирующим газом SF₆, расположены: первичная обмотка, колонна выпрямительных секций, магнитопроводы обратного потока (донный и цилиндрический). Первичная обмотка содержит 32 витка охлаждаемой водой медной трубки. Она генерирует продольное переменное магнитное поле с частотой питающей сети 400 Гц. Со стороны высоковольтного зазора витки первичной обмотки прикрыты электростатическим экраном, выполненным из тонкого листа нержавеющей стали.

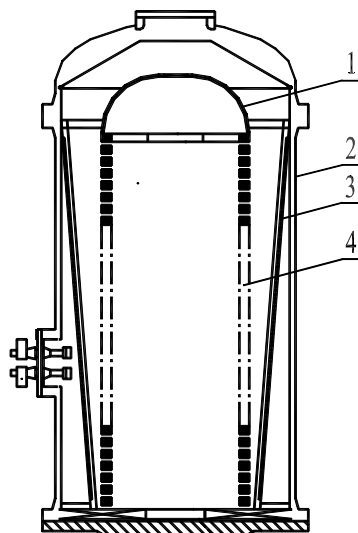


Рис. 1. Высоковольтный выпрямитель:

- 1 — высоковольтный электрод;
- 2 — сосуд высокого давления;
- 3 — первичная обмотка;
- 4 — выпрямительные секции.

В отличие от “обычных” трансформаторов центральный магнитопровод в данной конструкции отсутствует. Снаружи первичная обмотка окружена магнитопроводом. Еще два магнитопровода помещены на днище сосуда и над высоковольтным электродом. Данные магнитопроводы устраняют нагрев бака вихревыми токами.

Колонна высоковольтного выпрямителя состоит из 37 соединенных последовательно выпрямительных секций. Каждая выпрямительная секция представляет собой катушку вторичной обмотки и выпрямитель, собранный по схеме с удвоением напряжения. Катушка содержит 3000 витков, разделенных полимерно-слюдяной изоляцией. Максимальное напряжение катушки – 20 кВ. Таким образом, выходное напряжение секции может достигать 40 кВ. Количество последовательно соединенных секций определяет максимальное выходное напряжение высоковольтного выпрямителя. Рабочее напряжение катушки в проекте не превышает 17 кВ, т.е. напряжение секции – 34 кВ. Для выпрямления переменного напряжения используются столбы СДЛ-0,4-800 с током до 0,4 А и максимальным обратным напряжением 80 кВ. Обратное напряжение столбов при работе в источнике не превысит 34 кВ. Конденсаторы типа К-15-10 являются фильтрующими и одновременно защищают элементы высоковольтного выпрямителя (катушки, диоды) от перегрузок, возникающих при пробоях вакуумной или газовой изоляции.

Питание первичной обмотки ускорителя осуществляется переменным напряжением частотой 400 Гц от преобразователя частоты. В настоящем проекте используется электромашинный преобразователь частоты. Электромашинные преобразователи привлекают своей дешевизной, простотой и надежностью. Они обладают приемлемым КПД (65 – 80% в зависимости от мощности). В принципе, возможно питание и от статических преобразователей частоты (с использованием ПВТ транзисторов), однако каких-либо явных преимуществ использования статических преобразователей частоты, за исключением более высокого КПД (85 – 92%), не имеется.

Нагрузочная характеристика выпрямителя.

Предельно упрощенную схему замещения каскадного генератора можно представить в следующем виде (Рис. 2):

Здесь L_s – индуктивность рассеяния высоковольтного трансформатора, L_μ – индуктивность намагничивания высоковольтного трансформатора, R – сопротивление нагрузки, приведенное к индуктивности намагничивания первичной обмотки.

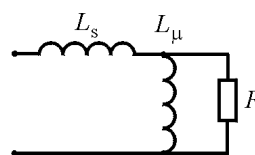


Рис. 2. Эквивалентная схема каскадного генератора

В отличие от трансформатора с центральным магнитопроводом в данной конструкции индуктивностью рассеяния пренебречь невозможно даже для самого грубого приближения. Отсутствие сердечника и изолирующий высоковольтный

зазор между обмотками приводит к тому, что $L_s \approx L_\mu$. Кроме того, распределенная межвитковая емкость катушек вторичной обмотки делает нагрузку резонансной. Резонансная частота выпрямителя примерно равна 1200 Гц. Поскольку рабочая частота источника 400 Гц, то резонансность не оказывает существенного влияния на работу выпрямителя. Наличие выпрямительных диодов и фильтрующих конденсаторов делает схему нелинейной. В рассматриваемой схеме выпрямителя большая величина L_s приводит к тому, что с увеличением нагрузки длительность импульса зарядного тока через диоды возрастает, и при подсадке $\alpha > 1,86$ длительность импульса зарядного тока становится равной полупериоду, а напряжение на катушках вторичной обмотки – прямоугольным (при синусоидальном напряжении на входе первичной обмотки) [3].

Для учета этих факторов в работе [3] введено понятие и получена универсальная нагрузочная характеристика трансформатора с индуктивностью рассеяния, работающего на выпрямитель с активно-емкостной нагрузкой.

Эта характеристика показывает зависимость подсадки α от величины $\omega L_1/R_H$, где $L_1 = L_s L_\mu / (L_s + L_\mu)$, а R_H – сопротивление нагрузки, приведенное к первичной обмотке.

Подсадка α равняется отношению выходного напряжения в режиме холостого хода к напряжению под нагрузкой. Если система стабилизации энергии поддерживает выходное напряжение постоянным, то подсадка α есть отношение напряжения первичной обмотки U_1 под нагрузкой и в режиме холостого хода:

$$\alpha = \frac{U_{0XX}}{U_{0H}} \Big|_{U_1=CONST} = \frac{U_{1H}}{U_{1XX}} \Big|_{E_0=CONST}.$$

На Рис. 3 приведена эта нагрузочная кривая.

Можно отметить, что при малых нагрузках напряжение подсаживается с большой скоростью, и это объясняется высоким содержанием гармоник в токе диодов, когда длительность зарядного тока мала. По мере увеличения нагрузки длительность импульсов тока возрастает, а относительное содержание гармоник уменьшается. Значения α больше 2 при работе источника обычно не используются.

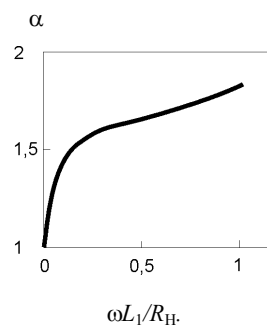


Рис. 3 Зависимость подсадки α от величины $\omega L_1/R_H$.

Допустимая нестабильность и допустимый уровень пульсаций

В случае обычного ускорителя ЭЛВ, когда электронный пучок выводится в атмосферу через окно из титановой фольги, пульсации или нестабильности ускоряющего напряжения приводят к тому, что границы раstra на фольге или зоны облучения материала на технологической линии размываются. Вследствие этого незначительно снижается коэффициент использования пучка. Гораздо важнее, что при уменьшении энергии углы отклонения пучка увеличиваются, и он может попадать на стенки выпускного устройства, что недопустимо, так как мощность электронного пучка может достигать сотни и более киловатт. Поэтому максимально допустимой величиной нестабильности энергии электронного пучка промышленных ускорителей принято считать $\pm 5\%$.

В случае вывода в атмосферу сфокусированного пучка через отверстия в диафрагмах пучок последовательно фокусируется двумя магнитными линзами. Газ, натекающий через диафрагмы, удаляется непрерывно работающими насосами системы дифференциальной откачки. Одним из главных параметров, определяющих размер отверстий (а следовательно и натекание газа в систему), являются хроматические aberrации магнитных линз. Здесь допустимая величина нестабильности энергии лежит в пределах $1 - 2\%$.

Требования к стабильности ускоряющего напряжения в комплексе для нейтронной терапии определяются как проводкой протонного пучка по тракту, так и режимом работы генератора нейтронов. В одном из вариантов предполагается поворот протонного пучка на 90 градусов. Полагая допустимым смещение протонного пучка на нейтронообразующей мишени 1 см при расстоянии до мишени 3 м, получаем требования к угловой стабильности $3,2 \cdot 10^{-3}$, т.е. $\Delta U/U \approx 5 \cdot 10^{-3}$. Более жесткие требования к стабильности предъявляются при работе в припороговом режиме, когда энергия протонов лежит в пределах $1,883 - 1,890$ МэВ. Здесь требуемая стабильность составляет 10^{-3} . Во втором режиме, когда энергия протонов равна $2,5$ МэВ, требования к стабильности энергии с точки зрения генерации нейтронов отсутствуют, и остаются только требования проводки пучка. Таким образом, стабильность источника ускоряющего напряжения для работы в составе комплекса нейтронзахватной терапии должна быть не хуже 10^{-3} [1].

Пульсации выпрямленного напряжения

Все источники высокого напряжения в ускорителях ЭЛВ по своей сути являются однофазными выпрямителями, работающими на емкостную нагрузку. Как уже упоминалось, главным их отличием является работа в режимах с большими углами отсечки (большой длительностью импульсов зарядного тока через диоды), что приводит к существенному снижению величины пульсаций выходного напряжения. Величина полного размаха пульсаций выходного напряжения определяется формулой

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{\beta}{2} \frac{T}{RC}.$$

Здесь T – период частоты питающего напряжения, равный в данном случае 2,5 мс; C – выходная емкость источника, состоящая из емкости выпрямителя, емкости высоковольтного электрода и емкости ускорителя тандема (величина C составляет примерно 400 пФ); R – сопротивление нагрузки, равное ускоряющему напряжению, деленному на ток нагрузки (в случае БНЗТ – двойной ток протонного пучка и минимальное $R = 15$ МОм); параметр β характеризует эффективное время разряда конденсаторов:

$$\bar{I}\beta\frac{T}{2} = \int_{t_1}^{t_2} [\bar{I} - I(t)] dt .$$

Параметр β зависит от подсадки, и эта зависимость приведена на Рис. 4.

Отметим, что этот параметр довольно быстро стремится к своему предельному значению, равному

$$\beta = \frac{1}{\pi} \arcsin\left(\frac{\bar{I}}{I_{MAX}}\right) = \frac{1}{\pi} \arcsin\left(\frac{2}{\pi}\right) \approx 0.2 .$$

Несмотря на столь сложную зависимость β от нагрузки зависимость величины пульсаций от тока нагрузки носит монотонный характер, и мы вправе использовать для оценок предельные значения.

Подставляя численные значения в данные формулы получаем величину пульсаций выходного напряжения для тока 80 мА равной $\pm 2,5\%$.

Эти результаты проверялись методом компьютерного моделирования с помощью программы NL. Приведенные аналитические выражения лишь способствуют лучшему пониманию процессов.

Принцип действия системы стабилизации энергии ускорителя ЭЛВ

По принципу действия рассматриваемая система стабилизации относится к непрерывным астатическим системам с замкнутым циклом регулирования. Подобные системы позволяют достаточно простыми способами обеспечить высокую точность, широкий диапазон регулирования, высокие показатели качества переходных процессов.

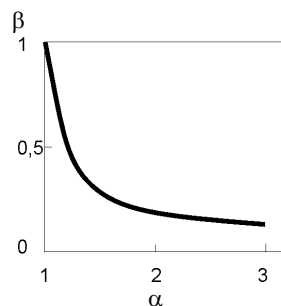


Рис.4. Зависимость β от подсадки α .

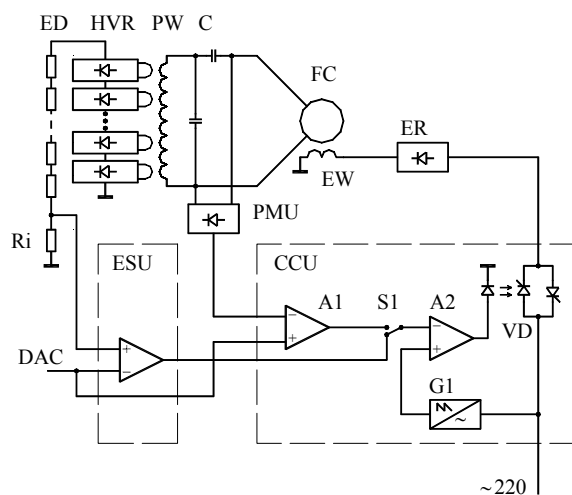


Рис. 5.
Функциональная схема
системы
стабилизации
выходного напряжения
каскадного
генератора.

На Рис. 5 показана функциональная схема системы. Замкнутый контур регулирования включает следующие звенья: объект регулирования, состоящий из каскадного генератора HVR и первичной обмотки PW; измерительное устройство ED; блок стабилизации ESU; блок управления преобразователем частоты CCU; электромашинный преобразователь частоты FC с обмоткой возбуждения EW и схемой питания этой обмотки ER; схема согласования импедансов C.

Рассмотрим кратко все звенья, входящие в петлю обратной связи.

Измерительное устройство

В системе стабилизации достижимая точность определяется точностью измерения высокого напряжения. В качестве измерительного устройства в ускорителях ЭЛВ используется резистивный делитель напряжения или роторный вольтметр. Резистивный делитель помещается внутри высоковольтных секций. Роторный вольтметр устанавливается на верхней крышке бака над высоковольтным электродом.

Наиболее простой метод для измерения высокого напряжения – использование резистивного делителя напряжения. К сожалению, отечественная промышленность не предлагает широкого выбора точных высоковольтных резисторов (микропроволочные прецизионные резисторы типа C5-23, C5-24 обладают большими габаритами, требуют специальных способов защиты от высоковольтных пробоев, вследствие этого плохо вписываются в конструкцию каскадного генератора). Наиболее подходящий конструктивно резистор типа C3-14 имеет допустимое

отклонение сопротивления $\pm 10\%$, температурный коэффициент сопротивления от $-2 \cdot 10^{-3}$ до $+10^{-3} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, что явно не удовлетворяет требуемым точностям. Однако многолетние наблюдения за уходом параметров ускорителей ЭЛВ, оборудованных делителями энергии на резисторах такого типа и калибровка этих делителей с помощью прецизионных делителей показывают, что точностные характеристики этих делителей заведомо укладываются в 5 %-ю шкалу. Такая точность достаточна для большинства технологических применений ускорителей ЭЛВ. Отметим, что здесь речь идет об абсолютной точности. Относительная точность в несколько раз выше и без учета температурной зависимости лежит в пределах 0,5 – 1 %.

Полоса пропускания резистивного делителя, помещенного внутрь высоковольтной колонны, ограничена паразитными емкостными токами с экранов катушек высоковольтных секций и составляет доли герца.

На ускорителях с энергией выше 2 МэВ и мощностью 100 кВт надежность работы делителя снижается. Это связано с тем, что при повышении мощности изменяется распределение напряжения по секциям высоковольтной колонны и увеличиваются пульсации выпрямленного напряжения, что приводит к возникновению коронного разряда на делитель и его разрушению. Поэтому для таких машин используется специально разработанный роторный вольтметр.

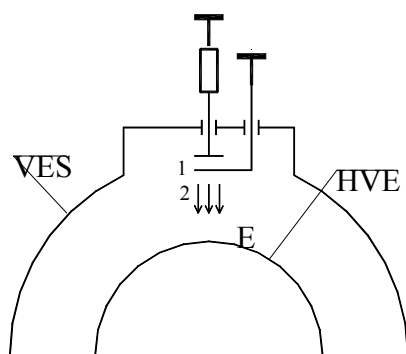


Рис. 6. К пояснению принципа действия роторного вольтметра.

Очевидно, что в изоляционном газовом зазоре между высоковольтным электродом HVE (см. Рис. 6) и заземленным баком ускорителя (VES) создается электрическое поле. Напряженность поля E в каждой точке пространства зазора пропорциональна величине приложенного напряжения. Если металлическую неподвижную измерительную пластину 1 и экранирующую подвижную заземленную пластину 2 поместить в электрическое поле высоковольтного электрода, и периодически то открывать, то экранировать измерительную пластину от электрического поля, то всякий раз при открывании измерительной пластины на ней будет наводиться заряд Q , величина которого пропорциональна напряженности поля E . При закрытии (экранировании) измерительной пластины этот заряд будет уменьшаться до нуля. Изменение заряда вызовет протекание переменного тока в измерительной цепи, величина которого пропорциональна напряженности поля, и, следовательно, высокому напряжению, которое создает это поле.

Принцип действия роторного вольтметра основан на эффекте индуцирования (разделения) зарядов на металлических поверхностях помещенных в электрическое поле.

Очевидно, что в изоляционном газовом зазоре между высоковольтным электродом HVE (см. Рис. 6) и заземленным баком ускорителя (VES) создается электрическое поле. Напряженность поля E в каждой точке пространства зазора пропорциональна величине приложенного напряжения. Если металлическую неподвижную измерительную пластину 1 и экранирующую подвижную заземленную пластину 2 поместить в электрическое поле высоковольтного электрода, и периодически то открывать, то экранировать измерительную пластину от электрического поля, то всякий раз при открывании измерительной пластины на ней будет наводиться заряд Q , величина которого пропорциональна напряженности поля E . При закрытии (экранировании) измерительной пластины этот заряд будет уменьшаться до нуля. Изменение заряда вызовет протекание переменного тока в измерительной цепи, величина которого пропорциональна напряженности поля, и, следовательно, высокому напряжению, которое создает это поле.

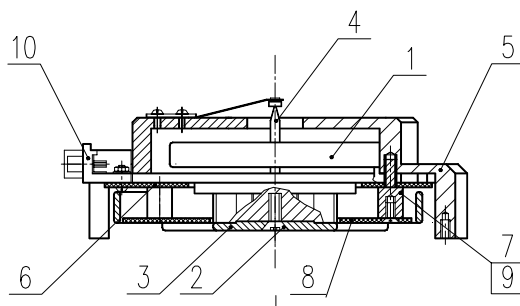


Рис. 7. Общий вид роторного вольтметра.

На Рис. 7 показан общий вид роторного вольтметра. На валу прямоприводного электродвигателя 1 винтом 2 закреплена крыльчатка (экранирующая подвижная пластина) 3, которая соединена с заземленным корпусом через бронзо-графитовый контакт 4. Электронные компоненты схемы роторного вольтметра смонтированы на печатной плате 6, которая совместно с двигателем закреплена в корпусе 5 с помощью стоек 7. Измерительная пластина 8, изготовленная из фольгированного стеклотекстолита, закреплена винтами 9 под вращающейся крыльчаткой на стойках 7. В крыльчатке выбраны два противоположно расположенных секторных отверстия, а на измерительной пластине методом травления изготовлены четыре сектора. Каждый сектор соединен с печатной платой проводником, и противоположные секторы объединены. Таким образом, вращающаяся крыльчатка поочередно открывает (закрывает) пары объединенных секторов.

Разработанный роторный вольтметр отличается простотой конструкции, малыми размерами (диаметр – 125 мм, высота – 50 мм) и легко встраивается в конструкцию ускорителя. Точность измерения определяется точностью входных напряжений цепей и температурными уходами зазора между высоковольтным электродом и измерительной пластиной вольтметра. Ее величина порядка 1 %.

Полоса пропускания роторного вольтметра определяется угловой скоростью вращения двигателя и составляет доли герца.

Исходя из вышесказанного можно сделать вывод, что данные типы измерительных устройств обеспечивают точность стабилизации выходного напряжения не лучше одного процента. Эта точность, являясь приемлемой для электронных ускорителей технологического назначения, является недостаточной для проекта БНЗТ, где требуемая точность составляет величину 10^{-3} .

Блок стабилизации

Блок стабилизации сравнивает входной задающий аналоговый сигнал DAC и выходной сигнал измерителя высокого напряжения, обеспечивает усиление сигнала ошибки, формирует амплитудно-частотную характеристику контура стабилизатора энергии. Усилитель сигнала ошибки выполнен по схеме ПИД-регулятора.

Пропорциональное, интегрирующее, дифференцирующее звенья выполнены на отдельных прецизионных операционных усилителях. Изменяя постоянные времени интегрирующего и дифференцирующего звеньев и коэффициент усиления пропорционального звена при настройке стабилизатора, можно достаточно легко обеспечить устойчивость регулятора, в то же время сохраняя высокие показатели качества регулирования. Блок выполнен на современной элементной базе. Используемые прецизионные операционные усилители способны обеспечить точность не хуже, чем 10^{-4} .

Блок управления преобразователем вырабатывает постоянный для питания обмотки возбуждения преобразователя частоты. Блок выполнен по схеме однофазного тиристорного регулятора. Фаза включения тиристоров определяется уровнем напряжения с выхода блока стабилизации. Так как время регулирования стабилизатора большое (порядка 1 секунды), можно считать, что данный блок не вносит существенных погрешностей в систему стабилизации.

Суммируя вышесказанное о системе стабилизации энергии ускорителей ЭЛВ, можно сделать вывод, что для использования данного каскадного генератора в проекте БНЗТ необходимо, во-первых, повысить точность измерительного устройства и, во-вторых, уменьшить пульсации выпрямленного напряжения.

Стабилизация ускоряющего напряжения ускорителя-тандема.

На Рис. 8 показана функциональная схема системы стабилизации ускоряющего напряжения и подавления пульсация ускорителя-тандема для проекта БНЗТ. От стандартной структуры системы стабилизации ускоряющего напряжения ускорителя ЭЛВ данная схема отличается системой активного подавления пульсаций выпрямленного напряжения.

Для повышения точности измерительного устройства в случае применения роторного вольтметра необходимо применить компенсационный тип вольтметра и механически обеспечить высокую точность его установки относительно высоковольтного электрода. Данное решение в принципе возможно, но достаточно трудно реализуется технически, поэтому мы выбрали вариант с резистивным делителем напряжения. Его можно изготовить из резисторов фирмы CADDOCK ELECTRONICS (USA) типа MG735 номиналом 100 МОм, точностью $\pm 0,1\%$ и температурным коэффициентом $80 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ или TG950, имеющих такую же точность, но температурный коэффициент которых составляет $25 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$. Данный делитель обеспечит точность измерения высокого напряжения на уровне 10^{-3} . Однако опыта использования данных резисторов в подобных источниках высокого напряжения нет. Резисторы могут стареть и быть нелинейными. Для компенсации эффекта старения резисторов и исключения зависимости сопротивления резисторов делителя от приложенного напряжения предполагается использовать дополнительное устройство, анализирующее энергию пучка нейтралов, сопутствующих протонам. Рассмотрение данного устройства выходит за рамки настоящей работы. Сигнал этого устройства (CORR), пропорциональный разности реальной и требуемой энергии

протонного пучка, поступает на один из входов блока стабилизации и корректирует значение выходного напряжения резистивного делителя. Отметим, что при работе этого анализатора требования к точности резистивного делителя снижаются и возможно использование апробированных резисторов С-3-14.

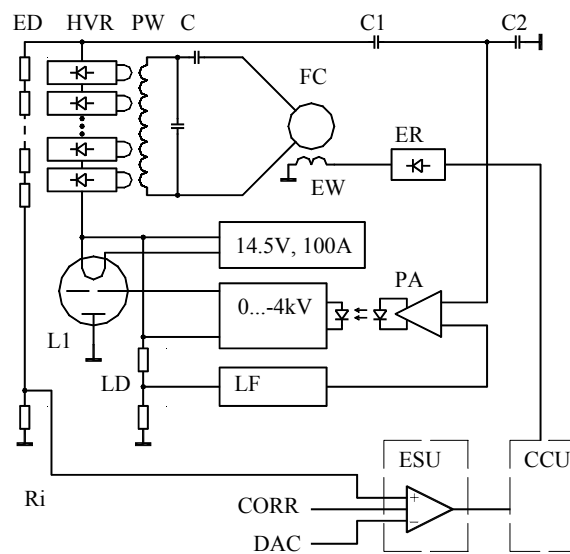


Рис. 8. Функциональная схема системы стабилизации и подавления пульсаций ускорителя-тандема.

Схема активного подавления пульсаций

Как было показано ранее, величина пульсаций выходного напряжения данного каскадного генератора при максимальном токе пучка будет составлять примерно $\pm 2,5\%$, что в абсолютных цифрах составляет ± 25 кВ. Для подавления этих пульсаций нужно включить регулирующий элемент в цепь тока выпрямителя. Только электронные лампы работают в этом диапазоне напряжений. Таким образом, мы можем установить регулирующую лампу на одном из выходов источника высокого напряжения. При установке лампы под высоким потенциалом между выходом источника ускоряющего напряжения и ускорителем-тандемом требуется лампа с допустимым напряжением анода несколько большим, чем размах напряжения пульсаций. Т. е. в этом случае необходимо выбрать лампу с допустимым напряжением анода около 60 кВ. Величина пульсаций может быть измерена с помощью емкостного делителя напряжения. Сигнал с этого делителя нужно усилить и в противофазе с пульсациями подать в цепь сетки лампы. Таким образом

пульсации высокого напряжения могут быть подавлены. Однако при установке лампы под высокий потенциал возникают трудности, связанные с охлаждением лампы, расположением ее в атмосфере сжатого газа. Более трудно технически организовать питание накала лампы и передачу управляющих сигналов с “земли” к сетке лампы.

Установка лампы со стороны “земляного” потенциала потребует более высоковольтной лампы, так как расчеты показывают, что коэффициент передачи по цепочке, образованной фильтрующими конденсаторами секций и конструктивными емкостями секций на экран первичной обмотки, не превышает 1/3. Однако проблемы охлаждения лампы решаются более просто.

Исходя из сказанного, в качестве регулирующего элемента выбран высоковольтный регулирующий триод типа ГПб-А с максимально-допустимым напряжением анода 180 кВ. Лампа работает с заземленным анодом, поэтому источник питания накала (14,5 В, 100 А) должен быть гальванически изолирован от земли. Необходимо также изолировать от “земли” питание встроенного в лампу магнитоэлектрического насоса.

Сигнал с емкостного делителя С1, С2 (см. Рис. 8) поступает на вход усилителя РА, который формирует амплитудно-частотную характеристику петли обратной связи системы подавления пульсаций. Усиленный сигнал через оптическую линию связи поступает на вход управляемого источника сеточного напряжения (0–4 кВ). Сигнал с резистивного делителя LD, поступающий на этот же усилитель, фиксирует режим лампы по постоянному току.

Заключение

Рассмотрена стабилизация выходного напряжения в источнике высокого напряжения каскадного типа с индуктивной связью и параллельным питанием каскадов, предназначенном для целей бор-нейтронозахватной терапии. Разработанная система обеспечивает поддержание ускоряющего напряжения с точностью лучше, чем 10^{-3} . Система активного подавления пульсаций позволяет поддерживать пульсации выпрямленного напряжения на таком же уровне. Принципы и методы заложенные в системе стабилизации могут применяться в других ускорителях и электрофизических установках.

Литература

1. В. Bayanov, V. Belov, E. Bender, M. Bokhovko, G. Dimov, V. Kononov, O. Kononov, N. Kuksanov, V. Palchikov, V. Pivovarov, R. Salimov, G. Silvestrov, A. Skrinsky and S. Taskaev. Accelerator based neutron source for the neutron-capture and fast neutron therapy at hospital. Nuclear Instr. and Methods in Physics Research A **413/2-3** (1998) 397-426.
2. R. Salimov, V. Cherepkov, J. Golubenko, G. Krainov, B. Korabelnikov, S. Kuznetsov, N. Kuksanov, A. Malinin, P. Nemytov, S. Petrov, V. Prudnikov, S. Fadeev and M. Veis.

DC high power electron accelerators of ELV-series: status, development, applications.
Radiation Physics and Chemistry **57** (2000) 661-665.