

ЭСУ под давлением

Конструкция содержит те же элементы, что и рассмотренный ЭСУ. Отличие заключается в том, что ускоритель полностью помещают в герметизированный стальной бак, заполненный газом под высоким давлением. Размеры установки в этом случае сравнительно малы.

Газ, используемый в качестве изоляции должен обладать высокой электрической прочностью при нормальном давлении, химической инертностью, доступностью и быть дешевым. Обычно используют N_2 , CO_2 и их смеси. При увеличении давления их электрическая прочность вначале растет линейно, а начиная с 10-15 атм – более медленно. Поэтому давление газа, которым заполняется бак У, как правило, не превышает 15-20 атм. Дальнейшее увеличение давления не дает ощутимого увеличения электрической прочности, а конструкция стального бака при этом существенно усложняется. Для увеличения электрической прочности газа к азоту или CO_2 добавляют фреон CCl_2F_2 или SF_6 так называемый элегаз. Так при 8 атм смесь CO_2 с элегазом, содержащая 4% SF_6 более чем в 1,5 раза прочнее своей основной компоненты CO_2 . Как и у обычного ЭСУ, важнейшей частью ЭСУ под давлением является зарядное устройство.. Для зарядки высоковольтного электрода служит гибкая лента, сделанная из изолирующего материала- чаще всего прорезиненной хлоробумажной ткани. Лента приводится в движение вращающимся валом. В нижней, низковольтной части на ленту наносятся электрические заряды; в верхней, высоковольтной части они снимаются. Движение зарядов, т.о. , происходит в направлении, обратном тому, по которому двигались бы заряды при возникновении обычного электрического тока. Заряд и потенциал , высоковольтного электрода при движении заряженной ленты постепенно увеличиваются. Это увеличение происходит до тех пор, пока токи утечки не сравняются с зарядным током, или пока не возникнет электрический пробой.

Как и в обычном ЭСУ электрические заряды наносятся на ленту и снимаются с нее с помощью разряда, возникающего на концах специальных – зарядных или разрядных острий (игл) . Зарядные иглы устанавливаются вблизи ленты, на них подается напряжение несколько десятков кВ, достаточное для того, чтобы заряды начали стекать с острия.

Когда заряженная часть ленты оказывается внутри высоковольтного электрода, заряды с ленты снимаются. Напряжение на снимающих остриях создается небольшим генератором, расположенным внутри высоковольтного электрода. Генератор приводится в движение ведомым валом ленты. Внутри высоковольтного электрода приходится располагать различное вспомогательное оборудование. В этой связи высоковольтный электрод имеет поэтому форму колпака, а весь генератор Ван-де-Граафа прикрыт другим, еще намного большим толстостенным колпаком, способным выдержать давление 10-15 атмосфер. Для увеличения электрической прочности внутрь колпака накачивается тщательно осушенный газ. Под давлением находятся все части генератора, кроме внутренней полости высоковольтной трубки: как уже говорилось, она откачивается до высокого вакуума.

Зарядное устройство генератора Ван-де-Граафа отличается важной особенностью. Огромные разности потенциалов создаются механическим путем: движущаяся лента «наильно» переносит заряды с низковольтной стороны внутрь высоковольтного электрода. Эти заряды сами переходят на его поверхность, как только токосъемные острия создадут для них проводящую «дорожку»: ведь заряды не могут находиться внутри проводника и при первой возможности устремляются к его наружной поверхности. Мегавольтные напряжения

в генераторе Ван-де-Граафа приложены не к трансформаторам и выпрямителям, питающим остря, а к механическим устройствам: к ленте и к ускорительной трубке. Следовательно именно их электрическая прочность — и электрическая прочность газа, заполняющего генератор — определяют наибольшие достижимые разности потенциалов.

Мы уже отмечали, что электростатические генераторы на мегавольтные напряжения представляют собой крупные сооружения. Большие генераторы имеют обычно вертикальную конструкцию: высоковольтный колпак устанавливается над низковольтным электродом. Ускоряющая трубка и лента расположены вертикально. Полная высота генераторов составляет несколько — иногда до 10 — метров.

Хотя конструкция генераторов Ван-де-Граафа кажется несложной, обращение с ними требует исключительной тщательности и терпения.

Целые недели уходят на их сборку, проверку и наладку. А затем события нередко развиваются следующим образом. Вот трубка собрана, промыта и проверена па вакуум. Собран и проверен делитель напряжения. Собраны устройства, расположенные внутри высоковольтного электрода. Проведены электрические проверки — насколько их можно провести на воздухе, т. е. при напряжениях от силы несколько сот киловольт. Проведены и вакуумные испытания. Это делается в облегченных условиях, т.е. при атмосферном давлении, а при работе они попадут под давление 10-15 атм. Наконец, после всех проверок, генератор закрывают колпаком высокого давления, затягивают десятки болтов, откачивают из колпака воздух, заполняют его смесью азота и элегаза, начинают поднимать напряжение и тут обнаруживается, что лента сильно натянута или качается при движении, где-то на половине рабочего напряжения обнаруживается натекание газа внутрь трубки или пробой, отказывает клапан подачи газа в ионный источник, обнаруживаются неисправности которые нельзя увидеть пока генератор не закрыт колпаком и т.д. Все приходится начинать сначала...

Несколько часов уходит на то, чтобы откачать генератор от высокого до атмосферного давления. Это надо делать осторожно, потому что элегаз ядовит. Целый день приходится отвинчивать болты, крепящие колпак к основанию. Потом колпак снимают подъемным краном и отставляют в сторону. Начинаются новые испытания — и обнаруживается, что все в порядке. Неисправность устранилась сама собой, когда установка попала в те условия, в которых ее собирали. Давления вернулись к обычным. Напряжения уже не так велики. Лента не качается. А если надеть колпак и накачать азот — все начнется сначала. Неисправность необходимо найти и устранить. Высказываются предположения. Что-то укрепляется, что-то заменяется. Новая сборка, новая проверка, новый подъем напряжения. Хорошо, если причину нашли или угадали. А если нет — все начнется сначала. Нелегкая это работа — налаживать генераторы Ван-де-Граафа!

Как уже говорилось, на электростатических генераторах удается получать напряжение порядка 10-15 мегавольт. Однако с помощью небольшой хитрости эффективную величину напряжения удастся увеличить в два раза. Это делается следующим образом. Две ускорительных трубки ставят одну на другую и располагают высоковольтный электрод между ними. Вторые концы трубок находятся при потенциале Земли. Сверху в первую трубку впускаются отрицательные (содержащие лишние электроны) ионы ускоряемого вещества, чаще всего, водорода или дейтерия. Обычно ионы водорода заряжены положительно. Их получают, впуская газ в область, в которой горит электрический разряд. В разряде молекулы разбиваются на атомы, а

атомы теряют электроны, превращаясь в положительные ионы. Но оказывается, что бывают и отрицательные ионы водорода: ионы, содержащие лишний электрон. У такого иона вокруг единственного протона крутятся целых два электрона. Отрицательные ионы водорода мало устойчивы. Даже при небольшом ударе они теряют не только «лишний», но и «родной» электрон. При этом они превращаются в обычные положительные ионы — в протоны.

Отрицательные ионы, двигаясь от источника к положительно заряженному высоковольтному электроду, ускоряются до энергии, определяемой потенциалом этого электрода. Если пропустить эти ионы — как они есть — во вторую трубку, то они снова замедлятся и подойдут к выпускному отверстию с нулевой энергией. Однако на пути ко второй трубке ионы проходят через тонкую фольгу. «Продираясь» сквозь нее, ионы теряют оба свои электрона; остаются «голые», положительно заряженные протоны. Они теперь уже не притягиваются, а отталкиваются высоковольтным электродом и на пути к выпускному отверстию вновь приобретают энергию. Ускорители, построенные по этому принципу, называются *тандем-генераторами*. К сожалению, повторить этот процесс не удастся. При прохождении через вещество ионы могут только терять электроны. Отрицательные ионы таким способом сделать нельзя.

Отметим важное преимущество тандем-генераторов перед обычными. У обыкновенных электростатических генераторов одна из наиболее сложных, капризных и энергоемких частей ускорителя — источник ионов — находится под высоким потенциалом, внутри высоковольтного колпака. У тандем-генераторов источник находится при потенциале Земли, что резко упрощает его питание и обслуживание.

Характеризуя электростатические генераторы необходимо отметить, что генераторы Ван-де-Граафа позволяют поддерживать ускоряющее напряжение постоянным с изумительной точностью и оказываются незаменимыми при изучении резонансных реакций, т.е. реакций, происходящих только при определенных энергиях налетающих частиц. Резонансы часто бывают очень узкими, так что изменение энергии на несколько десятков вольт (при полной энергии, измеряемой мегавольтами) способно существенно изменить картину взаимодействия.

Важнейшим условием нормальной работы электростатических генераторов, ускорительных трубок и отдельных элементов этих ускорителей является правильный выбор материалов, из которых они изготавливаются. Прежде всего их выбор обусловлен необходимостью обеспечения высокой электрической прочности и хорошего токопрохождения. Как уже отмечено, УТ делают секционированными, т.е. с промежуточными электродами, которые подключены к дискам, выравнивающим поле вдоль опорной колонны. Общая трубки и число секций зависят от величины рабочего напряжения. Например, ускоритель в Сакле (Франция) на 5 МВ, работает с трубкой длиной 3,75 м, имеющей 50 секций. Средняя напряженность электрического поля вдоль трубки составляет $1,33 \cdot 10^6$ в/м. Промежуточные электроды изготавливают из меди, нержавеющей стали, алюминия. В качестве изоляторов используют фарфор или стекло. Остаточное давление газа в УТ не превышает 10^{-4} мм рт.ст. Из-за непрерывного газовыделения элементами конструкции и натекания газа из ионного источника, трубка работает при непрерывной откачке, которая ведется высокопроизводительными диффузионными и форвакуумными насосами. В качестве источника ионов в настоящее время применяют источники с холодным катодом в магнитном поле, источники с высокочастотным катодом и др.

Упомянутые выше тандем-генераторы или ЭСУ с перезарядкой позволяют получать частицы с удвоенной энергией. Примером перезарядного ЭСУ является работающий в НИИ электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова перезарядный ЭСУ типа ЭГП-10 (электростатический генератор протонов) с максимальной энергией 10,5 МэВ. Вся высоковольтная часть этого ускорителя находится в цилиндрическом баке диаметром 3 м и высотой 11,5 м. Бак заполнен сжатым газом при давлении 16 атм. Изолирующая колонна ускорителя состоит из секций длиной 2,1 м каждая. Секции собраны на 4-х стойках, изготовленных из смеси эпоксидной смолы и кварцевой крошки. Внутри изолирующей колонны расположены УТ, делитель напряжения и лента транспортера зарядов. Каждая из УТ состоит из 2-х секций по 2,1 м. В трубках используются электроды конусной формы из нержавеющей стали. В качестве изоляторов применяются фарфоровые кольца d 330/280 мм и Н 37 мм. Промежуточные электроды расположены под углом к оси трубки для создания переменного-наклонного поля. Источник отрицательных ионов – дуоплазмотрон – имеет катод в виде никелевой сетки, покрытой оксидным слоем, и анод с отверстием d 0,5 мм. Анодный ток источника стабилизирован и равен 2,5 А. Ток ионов на выходе источника составляет 20-30 μ А. Из источника, размещенного на верхней крышке бака, пучок частиц попадает в первую УТ. После ускорения в ней пучок через отверстие диаметром 10 мм входит в область, где происходит перезарядка ионов – **обдирочную мишень**. Она представляет собой трубку длиной 550 и диаметром 6 мм, через которую проходит поток CO_2 . Газ поступает из баллона через специальный натекаль. Расход газа составляет 12 $\text{см}^3/\text{час}$. Откачка газа из области перезарядки осуществляется через нижнюю УТ. Образовавшийся в результате перезарядки пучок положительных ионов в дальнейшем ускоряется во 2-й трубке. Ток ускоренного пучка в мишени равен 10 μ А.

Описанные типы ЭСУ нашли широкое применение при проведении ядерных исследований в диапазоне энергий 1-12 МэВ. Простота регулировки выходного напряжения, ионного тока, а также высокая стабильность этих параметров ставит такие У в данном диапазоне энергий вне конкуренции. В частности их используют в качестве вспомогательных агрегатов при наладке и градуировке регистрирующей и измерительной аппаратуры в лабораториях, где основным оборудованием являются ускорители, рассчитанные на более высокие энергии. Важной областью применения ЭСУ является использование их для инъекции заряженных частиц в другие, более крупные ускорители. Наконец, ЭСУ используют как источники жесткого рентгеновского излучения в промышленных и научных исследованиях.

Каскадные генераторы

Каскадные генераторы, или генераторы Кокрофта — Уолтона — это высоковольтная разновидность выпрямительных устройств с умножением напряжения. Такие устройства — в менее высоковольтном исполнении — сейчас широко применяются даже в бытовых телевизорах.

Начнем с обычного выпрямителя, собранного по одно-полупериодной схеме (рис. 1). Выпрямленное напряжение отбирается с конденсатора, который заряжается от повышающего трансформатора через диод, пропускающий электрический ток лишь в одном направлении,

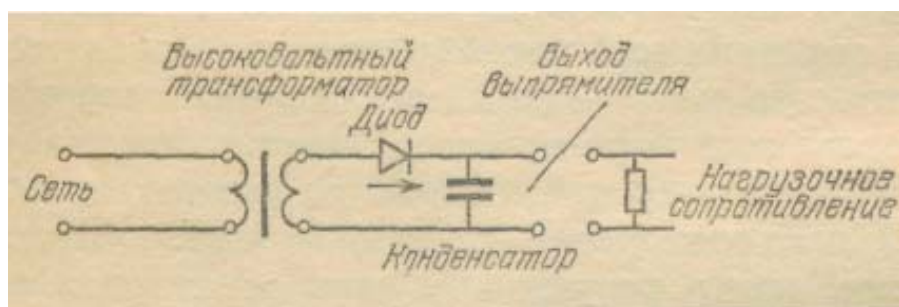


Рис. 1. Однополупериодный выпрямитель

указанном на чертеже стрелкой. Напряжение на трансформаторе изменяется по синусоидальному закону от $-U_m$ до $+U_m$. Когда на верхнем конце обмотки трансформатора оно выше, чем на нижнем, через диод течет ток, заряжающий конденсатор, а когда напряжение меняет знак, ток через диод прекращается. При следующем периоде переменного тока диод открывается не сразу, а лишь в тот момент, когда напряжение на обмотке превосходит по величине напряжение на конденсаторе. Конденсатор еще немного заряжается. Процесс зарядки останавливается, когда напряжение на конденсаторе станет равно амплитуде переменного напряжения на вторичной обмотке трансформатора. При включении нагрузки (к конденсатору присоединяется активное сопротивление) напряжение на нем слегка колеблется и в среднем оказывается ниже амплитуды переменного напряжения. Колебания связаны с тем, что конденсатор заряжается через диод в течение небольшой части периода, а теряет заряд непрерывно — вследствие тока, проходящего через сопротивление.

Чтобы получить от такого трансформатора более высокое напряжение, не перематывая его обмоток, применяют схему удвоения напряжения. Схема изображена на рис. 2. Рассмотрим сначала цепь, состоящую из вторичной обмотки высоковольтного трансформатора, диода 1 и конденсатора 1. Этот конденсатор заряжается от вторичной обмотки так же,

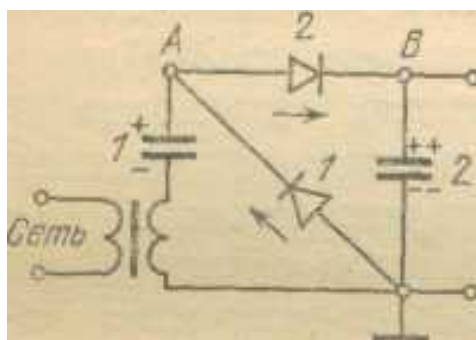


Рис. 2. Схема удвоения напряжения

как в схеме рис. 1. Процесс зарядки прекращается, когда напряжение на конденсаторе будет равно амплитудному значению напряжения на вторичной обмотке трансформатора. Напряжение в точке A меняется в такт с напряжением сети: оно равно нулю, когда напряжения на конденсаторе и на обмотке направлены навстречу друг другу, и оказывается вдвое больше амплитудного значения, когда эти напряжения складываются. Таким образом, размах колебаний в точке A равен $2U_m$ (U_m в каждую сторону), а центр колебаний смещен к значению U_m .

Между точкой A и землей включена цепь, состоящая из диода 2 и конденсатора 2. Как ясно из предыдущего, к этой цепи приложено переменное напряжение, изме-

няющееся от нуля до $2U_m$. Конденсатор 2 заряжается поэтому до удвоенного напряжения, т. е. до $2U_m$. Это напряжение при отсутствии нагрузки оказывается постоянным, а при ее наличии несколько пульсирует с периодом сети.

Важное преимущество схемы рис. 2 заключается в том, что трансформатор не должен рассчитываться на двойное значение напряжения. Один его конец заземлен, а напряжение на втором конце никогда не превосходит напряжения на самой обмотке, т. е. обычного амплитудного напряжения вторичной обмотки U_m .

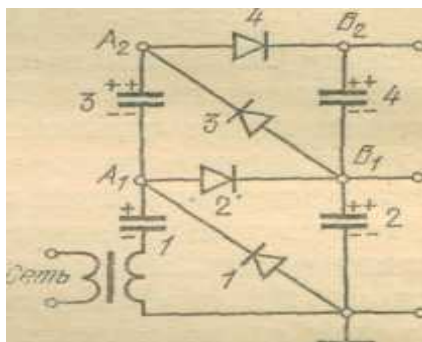


Рис.3. Умножитель напряжения

Попробуем увеличить число каскадов умножения. Рассмотрим схему рис. 3. Ее «первый этаж» нам уже знаком. Напряжение в точке A_1 колеблется в течение периода от нуля до $2U_m$. Напряжение в точке B_1 постоянно и равно $2U_m$. Перейдем ко «второму этажу» схемы. Напряжения в точках A_2 и A_1 отличаются напряжением на конденсаторе 3. Следовательно, потенциал A_2 меняется в течение периода на $2U_m$, как и потенциал A_1 . Между какими значениями он меняется? Пока конденсатор 3 не заряжен, потенциал A_2 не отличается от A_1 вместе с ним опускается до нулевого значения и тогда через 3-й диод из B_1 течет ток, заряжающий конденсатор. Потенциал A_2 поднимается до тех пор, пока напряжение на конденсаторе 3 не станет равно $2U_m$. После этого потенциал A_2 будет меняться от $2U_m$ до $4U_m$, напряжение в точке A_2 не будет опускаться ниже напряжения в B_1 и ток через диод прекратится. Нетрудно понять, что ток, проходящий через четвертый диод, зарядит при этом конденсатор 4 до напряжения $2U_m$. Потенциал точки B_2 окажется равен сумме напряжений па конденсаторах 2 и 4, т. е. будет равен $4U_m$.

Схему каскадного генератора можно «надстраивать» новыми и новыми этажами. При n этажах напряжение на схеме равно $2nU_m$. При этом трансформатор никогда не оказывается под потенциалом выше U_m , ни на одном конденсаторе напряжение не превосходит $2U_m$, ни на одном диоде не возникает перепад напряжения больше $2U_m$. Таким образом, рассчитанный на высокое напряжение каскадный генератор собирается из сравнительно низковольтных деталей. Полное напряжение приложено только к опорным конструкциям, па которых крепятся находящиеся под высоким потенциалом детали.

Каскадный генератор не только позволяет подавать высокое напряжение на верхний электрод ускорительной трубки; напряжения с его последовательных «этажей» как бы специально сделаны для ее промежуточных электродов.

При огромных достоинствах каскадные генераторы обладают и рядом существенных недостатков. Напряжение на генераторе плохо регулируется. При нагрузке генератора в его напряжении начинают появляться пульсации подобно тому, как это происходит в простом однополупериодном выпрямителе. Чем больше ступеней умножения содержит

генератор, тем сильнее выражены пульсации. Каскадные генераторы непригодны поэтому для особенно точных измерений. На них не удастся получить таких высоких напряжений, как на генераторах Ван-де Граафа. Это происходит потому, что высоковольтная часть таких генераторов содержит много деталей, очень велика и сложна по устройству. Ее нельзя спрятать под один высоковольтный колпак, как это делается в электростатическом генераторе, и не просто поместить в сосуд под давлением. Но при не очень высоких напряжениях в особенности при напряжениях до 1 МВ, эти схемы очень удобны и применяются чаще других.

Таким образом, в принципе действия КУ заложено свойство простой схемы выпрямителя, работающего на емкостную нагрузку, создавать между определенными точками напряжение, величина которого больше напряжения вторичной обмотки питающего трансформатора. Т.е. от сравнительно низковольтного источника можно получить высокое (несколько Мегавольт) ускоряющее напряжение. Напряжение, которое можно получить от таких умножителей определяется электрической прочностью элементов, входящих в схему, а также электрической прочностью окружающей среды. Каких либо ограничений в самой принципиальной схеме не заложено. Сейчас имеются КУ на напряжение свыше 3МВ.

Разумеется, что такое напряжение достигается только теоретически, на практике, в реальной схеме имеются паразитные емкости шунтирующие вентили и нагрузку и приводящие к уменьшению выходного напряжения. Для уменьшения потерь используют симметричную схему КУ

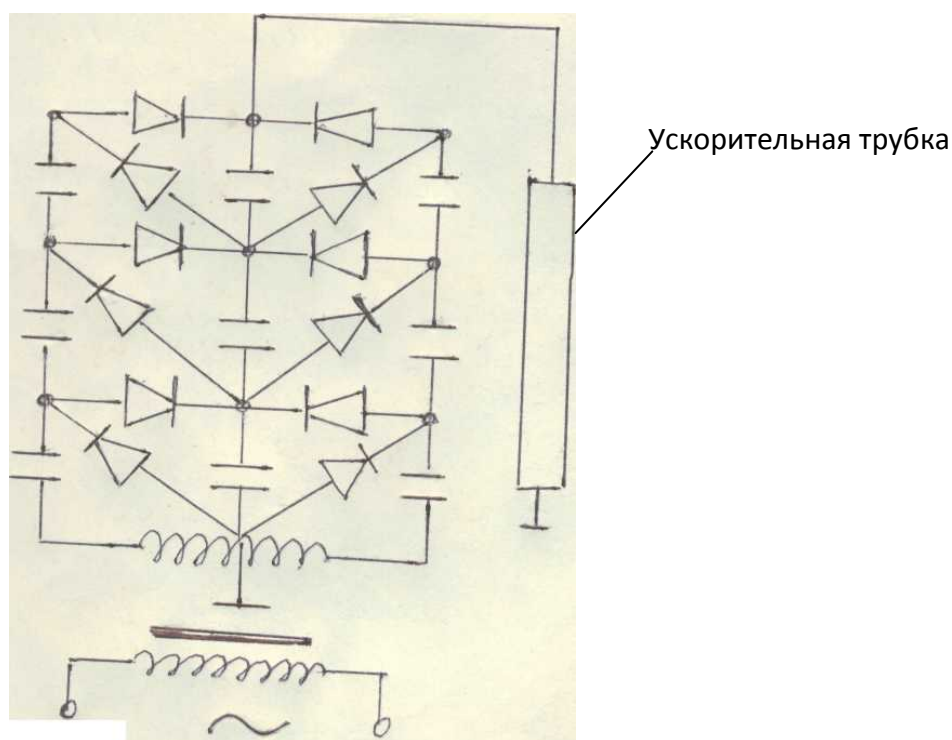


Схема состоит из трансформатора, вторичная обмотка которого имеет заземленную среднюю точку, и трех цепочек конденсаторов, соединенных между собой вентилями. К средней цепочке конденсаторов подключается нагрузка. Максимальное выходное напряжение в этой схеме также $2nU_m$, но потери и пульсации меньше.

Совершенно очевидно, что для повышения выходного напряжения нужно либо увеличивать амплитуду питающего напряжения на вторичной обмотке трансформатора, либо увеличивать число каскадов. Ввиду того, что величина потерь зависит от числа каскадов, т.е. при некотором n из-за значительного внутреннего падения напряжения рост выходного напряжения замедляется, выбирают некоторое оптимальное число каскадов усиления

$$n_{\text{оптим}} = \sqrt{\frac{f C U_m}{I_0}}$$

Для симметричной схемы $n_{\text{оптим}}$ в два раза больше. Здесь f – частота питающего напряжения; C – емкость конденсаторов; U_m – амплитуда питающего напряжения; I_0 – ток разряда.

Увеличение f возможно до некоторого предела, т.к. при повышенных f начинает сказываться влияние паразитных емкостей и затрудняется настройка схемы. Увеличение C хотя и желательно, но не всегда возможно из-за сложности изготовления конденсаторов.

Особые требования предъявляются к вентилям работающим в схемах КУ. Они должны иметь малое вторичное сопротивление в проводящем состоянии и выдерживать в запертом состоянии возможно большее обратное напряжение U'_{max} . Величина U'_{max} однозначно определяет допустимое амплитудное напряжение на вторичной обмотке трансформатора U_m . В качестве вентилях могут быть использованы кенотроны, секционные газотроны и полупроводниковые диоды. Кенотроны и секционные газотроны имеют большое обратное напряжение 200-300 кВ. Но наличие у них накаливаемого катода создает серьезные трудности, связанные с обеспечением накала, т.к. катоды в схеме находятся под высоким потенциалом. Использование полупроводниковых диодов снимает проблему накала катода, вместе с тем для получения обратного напряжения приходится соединять большое число диодов, т.к. отдельный вентиль имеет сравнительно низкое обратное напряжение (несколько кВ

Ускорение заряженных частиц в КУ происходит в секционированной трубке. Секции трубки подключают к отдельным каскадам схемы умножения. Это позволяет уменьшить неравномерность распределения напряжения по длине трубки.

Габариты определяются размерами отдельных элементов. Для уменьшения габаритов ускорителя его помещают в атмосферу сжатого газа. КУ позволяет работать с большим током ускорительной трубки по сравнению с ЭСУ.