

ВСЕСОЮЗНОЕ ОБЩЕСТВО
ПО РАСПРОСТРАНЕНИЮ
ПОЛИТИЧЕСКИХ И НАУЧНЫХ
ЗНАНИЙ

ДОКТОР ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК
ПРОФЕССОР

Г. И. БАБАТ

Т О К И
ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Серия IV
№ 29

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»

Москва — 1956

ВСЕСОЮЗНОЕ ОБЩЕСТВО
ПО РАСПРОСТРАНЕНИЮ ПОЛИТИЧЕСКИХ И НАУЧНЫХ ЗНАНИЙ

Доктор технических наук
профессор

Г. И. БАБАТ

Т О К И
ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»

Москва



1956

ВВЕДЕНИЕ

Промышленная электротехника возникла в середине прошлого века. Первоначально электрическая энергия применялась для телеграфирования, освещения (дуговые лампы) и в гальванопластике. Затем появились лампы накаливания, электрические печи, центральные электростанции с генераторами, приводимыми в действие поршневыми паровыми машинами, электрические двигатели, электрическая сварка металлов. Вся эта техника была основана на применении электроэнергии постоянного тока.

В восьмидесятых годах прошлого столетия стала стремительно развиваться техника переменных токов. В эти годы и появилось понятие токи высокой частоты. Первоначально термин «высокая частота» применялся, чтобы отличить колебания с частотой 50 и 60 периодов в секунду от колебаний в 16 и 25 периодов в секунду. Затем его применили к звуковым частотам, используемым в обычной телефонии. С появлением радиотехники токами высокой частоты стали называть такие быстропеременные токи, которые возбуждают радиоволны.

В наше время на всех электростанциях мира электроэнергия вырабатывается в виде переменного тока с частотой 50 (СССР и европейские страны) или 60 (США) периодов в секунду. Это переменные токи низкой частоты. Они являются основой электроэнергетики.

Токи любых более высоких частот обычно получают путем преобразования низкочастотных токов. Токи с частотой в несколько сот периодов в секунду применяются в промышленности для питания быстроходных двигателей. Они используются для вибрирования бетона, для привода ткацких веретен, в производстве искусственного волокна, для электропил, полировальных устройств и т. д.

В настоящей брошюре будет рассматриваться применение токов еще более высоких частот.

В 1873 году вышел из печати «Трактат об электричестве и магнетизме» английского физика Джемса Клерка Максвелла. В этой работе была развита «электромагнитная теория света» и даны знаменитые «уравнения Максвелла», из которых вытека-

ло, что переменные электрические токи могут вызывать электромагнитные волны и распространяться в виде лучей.

В конце восьмидесятых годов Генрих Рудольф Герц предпринял опыты, чтобы проверить теорию Максвелла. Он первый установил, что проводники, по которым циркулируют переменные токи, действительно порождают в окружающем пространстве электромагнитные волны. Герц подтвердил своими опытами, что частота переменного тока f и длина электромагнитной волны в свободном пространстве λ связаны соотношением: $\lambda = \frac{c}{f}$, где c — скорость света (300 тыс. км/сек или $3 \cdot 10^{10}$ см/сек). Герц дал первые формулы для расчета явления излучения электромагнитных волн и показал, что чем выше частота тока, тем легче электромагнитная энергия «отрывается» от токонесущих проводов и уходит в окружающее пространство. Единица измерения частоты колебаний, соответствующая одному периоду в секунду, в честь Генриха Герца получила название *герц* (тысяча периодов в секунду — *килогерц*, миллион — *мегагерц*).

В 1895 году Александр Степанович Попов впервые применил электромагнитные волны, порождаемые токами высоких частот, для передачи телеграфных сигналов без проводов и тем заложил основы радиотехники. Ныне техника токов высокой частоты — ТВЧ — чрезвычайно развилась и разветвилась. Радиосвязь, телевидение, радиолокация, радионавигация — все это отрасли высокочастотной техники.

В настоящей брошюре мы рассмотрим промышленное применение ТВЧ, а также некоторые применения ТВЧ для научных исследований.

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ТОКОВ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Проводник, которому сообщен электрический заряд, создает в окружающем пространстве электрическое поле. Во всяком другом проводнике или диэлектрике, находящемся в этом поле, появляются наведенные, так называемые индуцированные заряды. Это **э л е к т р и ч е с к а я** **и н д у к ц и я**.

Проводник, по которому движутся электрические заряды, т. е. идет электрический ток, создает вокруг себя магнитное поле. Всякое изменение этого магнитного поля, всякое ослабление или увеличение тока в проводнике, возбуждающем поле, вызывает появление в окружающем пространстве наведенных — индуцированных электрических напряжений. Это **э л е к т р о м а г н и т н а я** **и н д у к ц и я**.

Величины индуцированных зарядов, напряжений, токов зависят от многих факторов: от свойств среды, в которой действуют электрические и магнитные силы (от диэлектрической проницаемости ϵ и от магнитной проницаемости μ), от формы и

размеров проводников первичной (индуктирующей) цепи и вторичной (той, в которой наводятся заряды и токи), от расстояния и взаимного расположения первичной и вторичной цепей. Но в первую очередь явления электрической и электромагнитной индукции зависят от быстроты изменения электрических и магнитных сил — от частоты тока.

На рис. 1 схематически показаны различные способы передачи энергии электрической и магнитной индукцией.

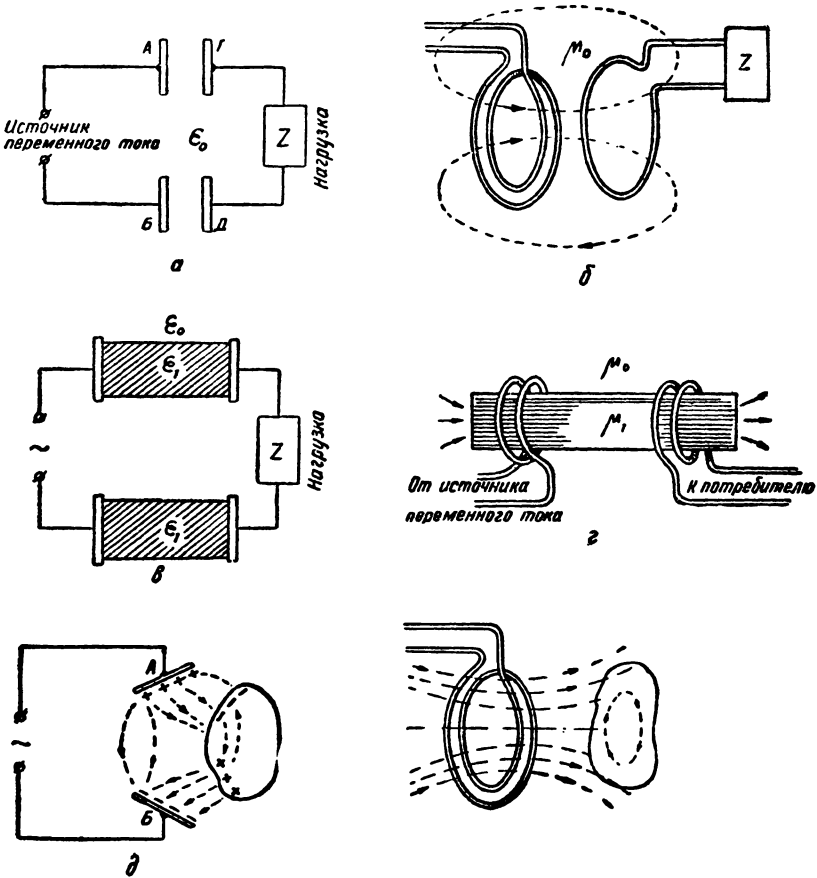


Рис. 1. Бесконтактная передача электромагнитной энергии: а) передача энергии между двумя цепями электрической индукцией; б) передача энергии между двумя цепями магнитной индукцией; в) передача энергии электрической индукцией с применением диэлектриков, обладающих повышенной диэлектрической проницаемостью ϵ ; г) передача энергии магнитной индукцией с применением магнитопроводов с высокой магнитной проницаемостью; д) и е) передача энергии электрической и магнитной индукцией сплошным массивам.

Ток, циркулирующий в проводнике, насыщает пространство вокруг этого проводника электромагнитной энергией. Запас ее равен половине произведения самоиндукции проводника L (эту величину можно назвать электромагнитной инерцией проводника) на квадрат силы тока i в проводнике $\frac{Li^2}{2}$.

Электрическое напряжение, действующее между двумя проводниками (или двумя участками проводника), также создает запас энергии в окружающем проводники пространстве, но уже не в магнитном, а в электрическом поле. Если электрическую емкость нашей системы проводников обозначить буквой C , а напряжение U , то запас энергии в электрическом поле равен $\frac{CU^2}{2}$.

В проводнике, по которому идет ток, неизбежно происходят потери электрической энергии. Вследствие того, что проводник обладает активным сопротивлением R , электрическая энергия частично превращается в тепло. Эти потери за одну секунду равны i^2R .

При изучении цепей переменного тока (особенно цепей тока высокой частоты) вводят понятие о добротности цепи. Эта величина пропорциональна отношению запаса энергии в электрическом или магнитном поле к потерям энергии за один период переменного тока. Добротность обозначают буквой Q (от латинского *qualitas* — качество).

Добротность численно равна:

$$Q = 2\pi \frac{\text{полный запас электромагнитной энергии в цепи}}{\text{потери энергии за один период}}.$$

Так как между длительностью периода переменного тока T и частотой тока f существует соотношение $f = \frac{1}{T}$, то добротность в том случае, когда, например, энергия запасается в магнитном поле, будет равняться: $Q = \frac{2\pi fL}{R}$.

Добротность может быть определена и таким выражением:

$$Q = \frac{\text{реактивное сопротивление цепи}}{\text{сопротивление потерь}}.$$

Когда рядом имеются две электрических цепи, то можно ввести понятие о коэффициенте связи между цепями. Коэффициент связи (его обозначают буквой k) показывает, какая часть силового поля (электрического, если цепи связаны электрическими силовыми линиями, или магнитного, если цепи связаны магнитным потоком) является общей для обеих цепей. Само собой разумеется, что коэффициент связи зависит от расстояния и взаимного расположения первичной и вторичной цепей. Самое большое значение коэффициента связи между

двумя электрическими цепями — это единица. В этом предельном случае силовые поля первичной и вторичной цепей полностью совпадают. Практически коэффициент связи всегда меньше единицы. По мере удаления одной цепи от другой коэффициент связи все уменьшается.

И добротность, и коэффициент связи — это числа отвлеченные, неименованные.

Процесс передачи энергии посредством индукции между двумя электрическими цепями можно схематически представить себе так: первичная цепь испускает силовое поле, а вторичная цепь его частично вбирает, впитывает. Потери при создании первичного силового поля определяются добротностью первичной цепи Q_1 ; вторичным контуром вбирается только какая-то часть энергии этого поля, определяемая величиной коэффициента связи k . Потери при вбирании первичного поля вторичной цепью определяются добротностью Q_2 вторичной цепи.

Не вдаваясь в промежуточные выкладки, приведем в окончательном виде формулу для коэффициента полезного действия (к.п.д.) η передачи энергии между двумя электрическими цепями.

Полезная мощность, получаемая во вторичной цепи, относится к мощности, вводимой в первичную цепь, как:

$$\eta = 1 - \frac{2}{k \sqrt{Q_1 \cdot Q_2}} *$$

Высокая добротность может быть получена при высокой частоте тока. Чем меньше длительность периода тока, тем меньше будут при данных сопротивлениях R и токе I потери энергии за один период, и тем больше будет отношение запаса энергии к потерям за период. Чем быстрее происходит циркуляция электромагнитной энергии, чем меньше она задерживается на «складах» в электрическом и магнитном полях, тем меньше будут потери при ее передаче.

При высоких частотах можно создать электрическую цепь с добротностью больше ста или, в некоторых специальных случаях, даже больше тысячи.

При высокой добротности можно получить высокий к.п.д.

* Эта формула дает наивысший возможный теоретический предел для к.п.д. при передаче энергии электрической или магнитной индукцией. Практический к.п.д. может быть значительно ниже. Кроме того, эта формула дает точный результат только при достаточно больших значениях k и Q . Когда же произведение $k \sqrt{Q_1 \cdot Q_2} < 2$, формула приводит к абсурдному результату, что к.п.д. меньше нуля. При малых k и Q надо пользоваться другими формулами. Чтобы передавать электромагнитную энергию с высоким к.п.д., необходимо иметь большую величину произведения коэффициента связи на среднее геометрическое добротности первичного и вторичного контуров.

передачи даже в тех случаях, когда расстояние между первичной и вторичной цепями велико и коэффициент связи мал.

По мере повышения частоты тока соответствующая ему длина электромагнитной волны укорачивается. Когда длина волны становится сравнимой с размерами проводника, по которому она проходит, то электрические и магнитные силовые линии оказываются тесно переплетенными. Уже нет участков пространства, где действовали бы только одни электрические или только одни магнитные силы. При этом обнаруживается еще одно важное явление: электрические и магнитные силовые линии отрываются от проводников. Они образуют сгустки электромагнитной энергии, свободно распространяющейся в пространстве. Чем выше частота тока, тем более направленный луч



Рис. 2. Бесконтактная передача энергии электромагнитным излучением (различные варианты антенн).

электромагнитной энергии можно получить, тем на большее расстояние можно передать электромагнитную энергию с высшим к.п.д. (рис. 2).

Току с частотой 50 герц (*гц*), который циркулирует в наших силовых и осветительных сетях, соответствует электромагнитная волна, длина которой равна 6 тыс. км. Такая длинная линия электропередачи, как, например, линия Куйбышев—Москва, не превышает тысячи километров, т. е. она намного короче волны 50-периодного тока. В большинстве практических применений даже не приходится вспоминать о волновых свойствах этого тока. Энергия низкочастотного тока крепко «привязана» к проводам. Для подключения потребителя (лампы, двигателя и др.) необходим непосредственный контакт с токонесущими проводами, а если применяется электромагнитная индукция, то первичная и вторичная цепи должны быть тесно расположены и связаны ферромагнитным магнитопроводом.

Току с частотой 100 млн. герц (*мгц*) соответствует волна длиной 3 м. Для такой волны проводник длиной в полтора метра является антенной, которая легко излучает десятки киловатт. На сантиметровых волнах еще легче излучать энергию, посылать ее направленным потоком.

Токи высокой частоты вырабатываются специальными генераторами. Развитие различных применений ТВЧ зависит в первую очередь от степени совершенства этих генераторов.

ГЕНЕРАТОРЫ ТОКОВ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Развитие методов генерирования ТВЧ

Самый старый и вместе с тем наиболее простой способ получения высокочастотных электромагнитных колебаний — это разряд конденсатора через искру. Первые радиопередатчики А. С. Попова имели искровые генераторы с простейшими разрядниками в виде двух шаров, разделенных воздушным промежутком.

В начале нашего столетия появились усовершенствованные конструкции искровых разрядников: многопромежуточные и вращающиеся разрядники. В сочетании с этими разрядниками применялись схемы колебательных контуров с так называемым ударным возбуждением. Напряжение заряда рабочих конденсаторов доводилось до нескольких десятков киловольт. Таким образом удавалось получать мощность до сотни киловатт на волнах в несколько тысяч метров (с укорочением волны мощность искровых генераторов резко падает). В годы первой мировой войны искровые генераторы широко применялись для радиотелеграфной связи.

Недостаток искровых генераторов — это их низкий к.п.д. (обычно не выше 30%). В двадцатых годах искровые генераторы были окончательно вытеснены из радиотехники генераторами с электронными лампами. Установки промышленного нагрева (плавильные печи, нагреватели для пайки, закалки) до середины сороковых годов в отдельных случаях выполнялись с искровыми генераторами.

Первые годы развития радиотехники с искровыми генераторами конкурировали дуговые. В них в колебательный контур включался дуговой разряд. Один из электродов дуги — положительный — делался медным и охлаждался водой. Дуга имела одностороннюю проводимость — электроны могли проходить только от раскаленного угольного катода (отрицательного электрода) к холодному медному аноду. Дуга помещалась в атмосферу паров углеводорода (например, керосина) и, кроме того, на нее действовало сильное магнитное поле. Такая дуга имеет падающую характеристику — представляет собой отрицательное сопротивление. В контуре из емкости и самоиндукции, подключаемом к дуге, возбуждаются незатухающие колебания.

Дуговые генераторы строились на мощность до тысячи киловатт. Однако работа их была неустойчива, к.п.д. низок, и в годы первой мировой войны они окончательно вышли из употребления.

Одно из старейших, но сохранившее некоторое значение и до настоящего времени устройство для получения ТВЧ — это машинный генератор. В начале нашего века машинные генераторы строились на частоты вплоть до 100 тыс. герц (кГц). Однако та-

кие машины были ненадежны в работе, имели низкий к.п.д. Впоследствии машинные генераторы ТВЧ строились на частоты не выше 20 кГц. В сочетании с машинными генераторами применялись умножители частоты — электрические контуры (для более низких частот аперiodические, для более высоких — колебательные) с элементами, зависящими от силы тока или величины напряжения (так называемыми нелинейными элементами)¹.

Синусоидальное напряжение, подаваемое на нелинейный контур, искажается, из него можно выделить высшие гармоники — двойной, тройной или даже еще более высокой частоты.

Соединяя последовательно ряд удвоителей или утроителей частоты, можно из частоты в несколько килогерц получить частоту в сотни килогерц. Однако в умножителях частоты с любым типом нелинейных элементов относительно велики потери. Попытки применения умножителей частоты для промышленных установок делаются и в последнее время, но практически умножители частоты применяются лишь в отдельных случаях в слаботочных маломощных установках. Для мощных установок этот источник ТВЧ бесперспективен.

На рис. 3 показаны различные схемы источников токов высокой частоты, применявшиеся в первые годы развития высокочастотной техники.

Сорок лет тому назад появились генераторы ТВЧ с электровакуумными — электронными и ионными приборами. В настоящее время они занимают первое место среди прочих источников ТВЧ как по количеству действующих установок и суммарной установленной мощности, так и по перспективам дальнейшего развития. Однако значительное применение в промышленности еще имеют и машинные генераторы.

Машинные генераторы

Всякая машина, преобразующая механическую энергию в электрическую (или наоборот), состоит из двух частей, движущихся одна относительно другой, — статора и ротора. В большинстве конструкций ротор имеет форму барабана, укрепленного на валу, и вращается внутри неподвижного статора. Между статором и ротором имеется зазор, величина которого может быть от долей миллиметра (для малых машин) и до десятков миллиметров (у машин мощностью в сотни тысяч киловатт).

На электростанциях всего мира электроэнергия тока промышленной частоты (50—60 Гц) вырабатывается при помощи синхронных генераторов. Ротор представляет из себя электро-

¹ Нелинейным элементом может быть сопротивление (например, вентиль, обладающий односторонней проводимостью), индуктивность с ферромагнитным сердечником, у которого магнитная проницаемость зависит от силы тока, а также емкость с изоляцией из сегнетоэлектрика, у которого диэлектрическая проницаемость зависит от напряжения.

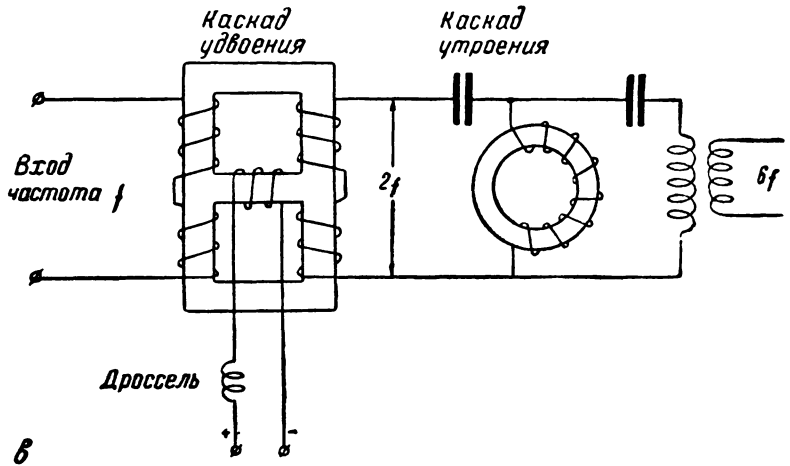
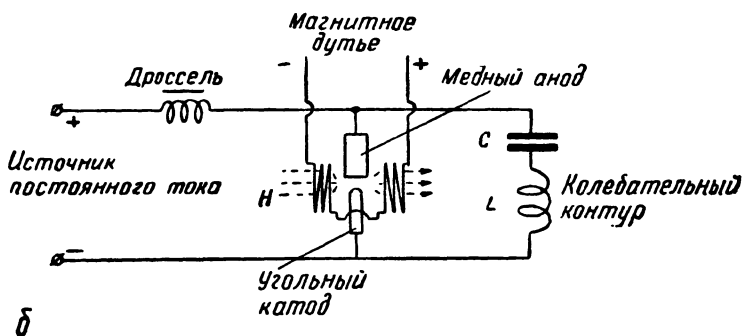
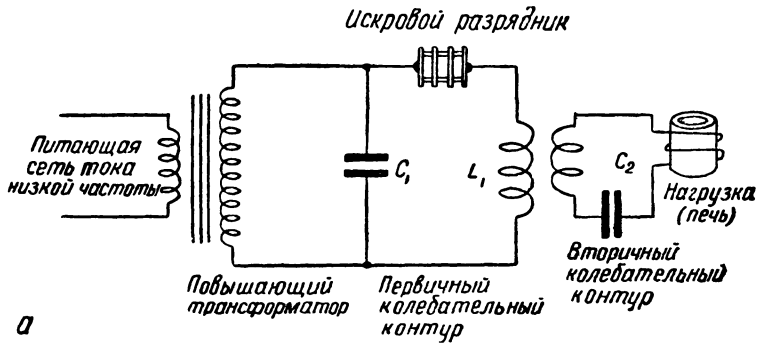


Рис. 3. Схемы источников токов высокой частоты: а) искровой генератор; б) дуговой генератор; в) многокаскадный умножитель частоты.

магнит с одной или несколькими парами полюсов. На роторе находится обмотка возбуждения, питаемая постоянным током. При вращении ротора его силовые линии пересекают рабочую обмотку статора и наводят в ней переменную электродвижущую силу (ЭДС). Частота тока в обмотке статора равна произведению числа пар полюсов ротора на число его оборотов в секунду. Так, например, для получения тока с частотой 50 гц двухполюсные генераторы соединяют с паровыми турбинами, делающими 3 тыс. оборотов в минуту.

Синхронные генераторы с обмоткой возбуждения и полюсами на роторе целесообразно строить на частоту не выше нескольких сотен герц. С увеличением числа пар полюсов возникают затруднения с размещением обмотки возбуждения на быстро вращающемся роторе.

Для выработки тока частотой в тысячу и выше герц применяются машинные генераторы так называемого индукторного (пульсационного) типа. У этих генераторов и рабочая обмотка переменного тока и обмотка возбуждения, питаемая постоянным током, находятся на статоре. На роторе никаких обмоток нет, но поверхность его имеет зубчатую форму. Соответствующие зубцы делаются и на статоре. При вращении ротора взаимное перемещение зубцов ротора и статора вызывает пульсацию магнитного потока возбуждения и индуктирование переменной ЭДС в рабочей обмотке генератора. Частота тока равна произведению числа зубцов ротора на число его оборотов в секунду. Например, для получения тока с частотой 2 500 гц (при скорости вращения ротора 3 тыс. об/мин) ротор должен иметь 50 зубцов.

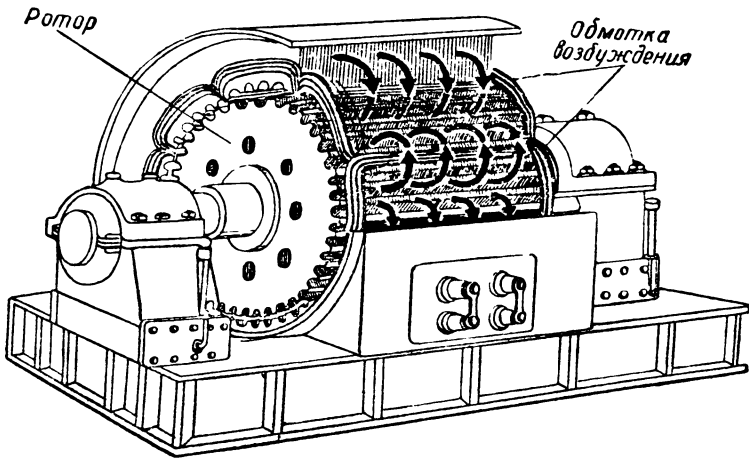
Существуют генераторы индукторного типа различных конструкций. На рис. 4 показаны основные типы современных генераторов ТВЧ.

В машинах сегментного типа магнитный поток, созданный обмоткой возбуждения, замыкается от сегмента к сегменту. В машинах другого типа обмотка возбуждения охватывает ротор кольцом.

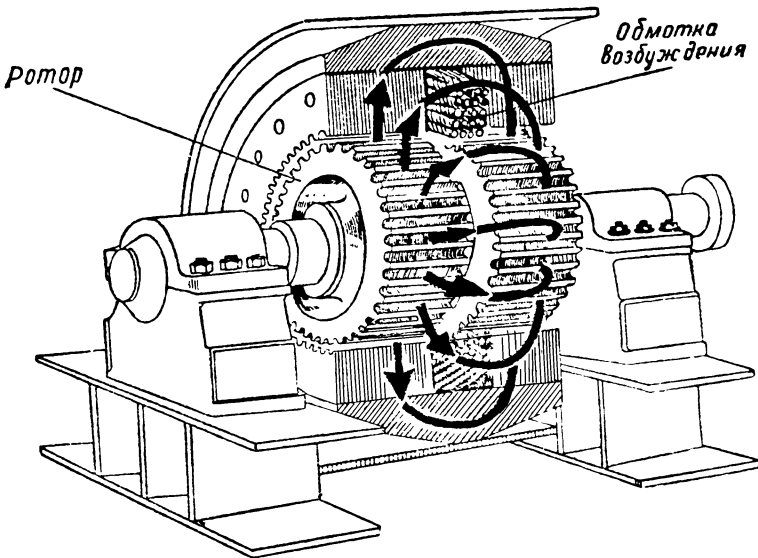
Для центральных электростанций в Советском Союзе и во многих других странах мира, как уже говорилось, принята стандартная частота 50 гц. Стандарт на повышенные частоты не установлен. На практике машинные генераторы в настоящее время вырабатывают ток частотой 500, 1000, 2500, 8000 гц.

Машинный генератор может вырабатывать ток только одной определенной частоты. Это является некоторым недостатком по сравнению с генераторами на электровакуумных (электронных и ионных) приборах, в которых частота легко может быть изменена в процессе работы.

Применяемые в Советском Союзе машинные генераторы повышенной частоты приводятся во вращение короткозамкнутыми асинхронными двигателями, питаемыми от трехфазной сети. В машинах мощностью до 150 квт включительно генератор и



а



б

Рис. 4. Машинные генераторы повышенной частоты индукторного типа (стрелки показывают направление магнитных силовых линий потока возбуждения): а) генератор сегментного типа; б) генератор кольцевого типа.

двигатель объединяются в одном общем корпусе. В некоторых типах машин статоры и роторы охлаждаются проточной водой. В роторы вода подается через сальники на концах вала.

Машинные генераторы повышенной частоты в настоящее время выпускаются на мощность до нескольких сотен киловатт. Рабочее напряжение их обычно бывает 500—2000 в. У агрегата, состоящего из двигателя-генератора, к.п.д. обычно бывает порядка 80% при частоте 2500 гц и до 70% при частоте 8 тыс. гц.

Все измерительные приборы и приборы регулирования цепи возбуждения генератора, а также измерительные приборы в цепи повышенной частоты — вольтметр, амперметр, ваттметр, фазометр — монтируются обычно в отдельном шкафу.

В высокочастотных машинных генераторах в качестве возбудителя часто применяются так называемые электромашинные усилители — ЭМУ. Это позволяет производить автоматическое регулирование тока возбуждения, автоматическую стабилизацию высокочастотного напряжения.

Генераторы на электронных лампах с управляющими сетками

В настоящее время наиболее распространены электронные лампы цилиндрической конструкции. Анод имеет форму полого цилиндра, внутри которого находятся одна или несколько сеток, обычно также цилиндрических. Центральным электродом является накаленный катод. Для промышленного генерирования ТВЧ чаще всего применяются односеточные лампы (трехэлектродные приборы — триоды, рис. 5). Многосеточные лампы — тетроды и пентоды — применяются редко.

Поток электронов, испускаемых накаленным катодом, движется к аноду, находящемуся под положительным напряжением. Если напряжение на управляющей сетке также положительно или слабо отрицательно, то электроны проходят сквозь сетку и достигают анода. При достаточно большом отрицательном напряжении на сетке поток электронов не может проникнуть сквозь сетку, и анодный ток «запирается».

Когда на сетке лампы действует переменное напряжение достаточно большой амплитуды, то постоянный ток, подводимый к лампе, дробится на отдельные импульсы. Работу лампы в таком режиме характеризуют две величины: 1) максимальное напряжение, при котором лампа может прервать ток, надежно его «запереть», и 2) минимальное падение напряжения на лампе, когда через нее проходит ток. Отношение падения напряжения на лампе к подводимому анодному напряжению в первом приближении определяет потери в лампе. Если, например, падение напряжения на лампе составляет 2500 в, а подводимое к ней напряжение питания — 10 тыс. в, то на полезной нагрузке, включенной в анодную цепь лампы, будет напряжение 7500 в. Потери в лампе будут составлять 25%, к.п.д. — 75%.

Усилия конструкторов направлены к тому, чтобы максимально повысить отношение допустимого напряжения питания к падению его в лампе. Повышение этого отношения путем значительного увеличения напряжения питания нецелесообразно. При этом возникают затруднения с изоляцией генератора ТВЧ. Хотя и могут быть созданы мощные генераторные лампы с рабочим напряжением выше 20 тыс. в, однако в СССР принято

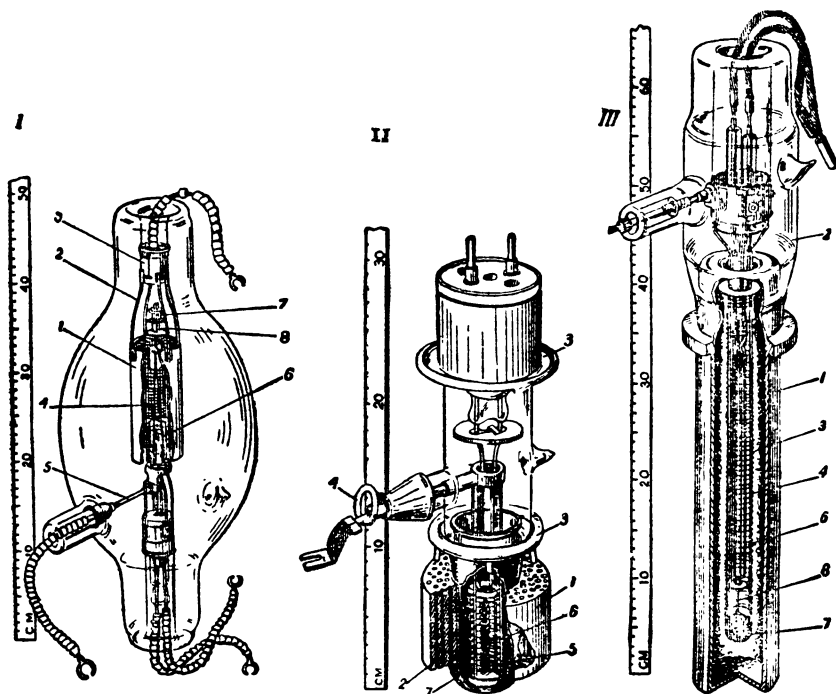


Рис. 5. Односеточные электронные лампы.

I. Электронная генераторная лампа с лучистым (радиационным) охлаждением анода (тип ГК-3000): 1—анод (из танталовой жести); 2 и 3—крепление анода; 4—сетка (из молибденовой или вольфрамовой проволоки); 5—вывод сетки; 6—катод (петля из вольфрамовой проволоки); 7—пружина, натягивающая катод; 8—изолятор между пружиной и сеткой.

II. Генераторная лампа с внешним медным анодом с воздушным охлаждением: 1—радиатор; 2—отверстия в радиаторе, через которые продувается воздух; 3 и 4—металлические кольца (экраны), выравнивающие распределение электрического поля между электродами лампы и предотвращающие пробой поверхности стеклянного баллона лампы; 5—катод из карбидированной торированной вольфрамовой проволоки; 6—сетка; 7—анод, к которому припаян радиатор

III. Генераторная лампа с водяным охлаждением анода: 1—анод; 2—стеклянный баллон; 3—сетка; 4—стойки, на которых держится сетка; 5 и 7—изоляторы; 6—катод; 8—стержень, центрирующий катод относительно сетки.

строить установки ТВЧ с анодным напряжением питания не выше 15 тыс. в. В установках малой мощности часто применяется и более низкое напряжение — 5000—2000 в.

Остаточное напряжение на электронной генераторной лампе зависит от расстояния между ее электродами (в основном от расстояния между катодом и сеткой). В мощных лампах с катодом из чистого вольфрама, который требует весьма высокой температуры накала (порядка 2400°C), расстояние катод — сетка достигает 5 мм. При этом отношение напряжения питания к остаточному напряжению получается не выше 20. В последнее время в мощных генераторных лампах все шире начинают применяться экономичные активные катоды (торированные, оксидные), работающие при температуре не столь высокой. Применение активных катодов позволяет уменьшить мощность, затрачиваемую на накал генераторных ламп, а также уменьшить зазоры между катодом и сеткой, что ведет к снижению остаточного напряжения.

В современных генераторных лампах потери энергии при преобразовании постоянного тока в высокочастотный обычно бывают не ниже 20%, а иногда достигают 40% и выше.

Теряемая в генераторной лампе энергия выделяется в виде тепла на ее аноде. Существуют различные способы удаления этого вредного тепла. В лампах, рассчитанных на мощность до 5 кВт, анод помещается внутри стеклянного баллона. При работе лампы анод сильно нагревается и часто становится оранжевого цвета. Тепло от анода рассеивается за счет лучеиспускания. Такое охлаждение называется лучистым (радиационным). Лампы на большую мощность выполняются с конвекционным охлаждением. У них анод делается из меди. Он составляет часть внешней оболочки лампы. Такой анод обдувается струей воздуха или омывается проточной водой.

Лампы с воздушным охлаждением выпускаются на мощность до 10 кВт. Более мощные лампы работают с водяным охлаждением.

Все генераторные лампы на мощность до 250 кВт являются так называемыми «запаянными приборами». В процессе их изготовления на электровакуумном заводе из них тщательно удаляются все газы, после чего лампа запаявается.

Срок службы подобных генераторных ламп, применяемых в промышленных установках ТВЧ, не менее 2 тыс. часов. Расходы на замену перегоревших ламп обычно составляют меньше 10% от стоимости преобразуемой ими электроэнергии.

На мощность 500 кВт и более иногда строятся разборные лампы. Они снабжаются насосами, которые должны быть включены в течение всего времени работы лампы. В такой лампе легко восстановить перегоревший катод или устранить другое повреждение. Однако разборные лампы сложнее в эксплуатации и требуют более квалифицированного обслуживания.

Существующие типы трехэлектродных генераторных ламп с цилиндрической конструкцией электродов могут вырабатывать переменный ток, начиная от сколь угодно низкой частоты и вплоть до частот порядка 100 мгц (волна 3 м). Типичные схемы генераторов ТВЧ показаны на рис. 6. В пределах от самых низких частот и до частот порядка 10 мгц к.п.д. генераторной лампы не зависит от частоты тока. Частота тока выбирается в соответствии с технологическими требованиями, а иногда и в зависимости от типа примененной в установке ТВЧ конденсаторной батареи.

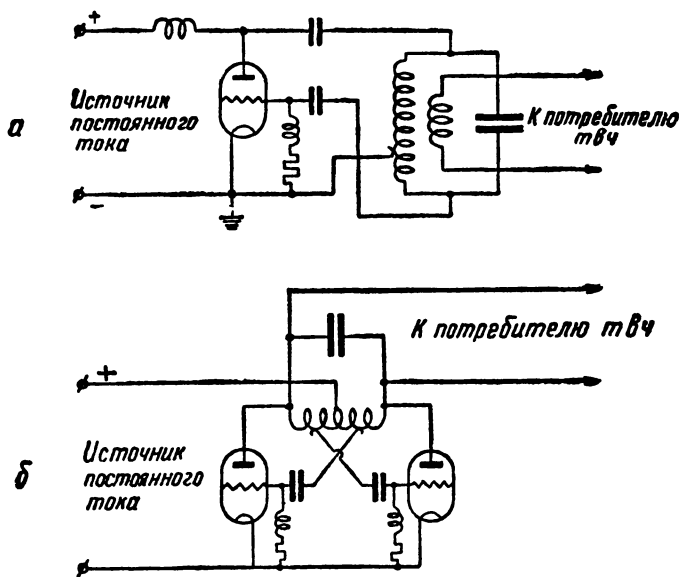


Рис. 6. Принципиальные схемы генераторов ТВЧ с электронными трехэлектродными лампами: а) одноламповая (однотактная) схема, б) двухламповая (двухтактная) схема.

При частотах тока выше 10 мгц в лампах вышеописанной конструкции время пролета электронов от катода к аноду уже становится сравнимым с длительностью одного полупериода высокочастотного тока. Появляется сдвиг фаз между импульсом сеточного напряжения и импульсом анодного тока. С повышением частоты тока начинает падать к.п.д. генератора.

Поэтому для частот выше 100 мгц применяются иные конструкции генераторных приборов, о которых будет сказано несколько позже.

При использовании токов с частотой ниже 10 кгц выгоднее применять не электронные, а ионные приборы.

Генераторы на ионных управляемых вентилях

Когда в баллоне лампы находятся пары ртути, водород или инертные газы (гелий, криптон, ксенон), то электроны, летящие от катода к аноду, сталкиваются на своем пути с атомами газа и ионизуют их. Образующиеся при этом положительные ионы компенсируют отрицательный пространственный заряд электронов, облегчается прохождение тока через прибор. Падение напряжения на приборе не превышает нескольких десятков вольт даже при токах в сотни и тысячи ампер.

Запираемое сеткой напряжение в ионных управляемых вентилях бывает несколько киловольт, а в некоторых высоковольтных конструкциях оно достигает десятков киловольт. Отношение напряжения питания к падению напряжения в ионных приборах может быть порядка нескольких сотен и даже тысяч. К.п.д. преобразователей с ионными вентилями может быть выше 90%, Высокий к.п.д. выгоден не только с точки зрения экономии энергии, но также и тем, что упрощается и облегчается вся преобразовательная установка. Вентиль с высоким к.п.д. имеет малые габариты. При мощностях порядка 100 кВт, при которых для электронных ламп обязательно охлаждение проточной водой, для ионных ламп достаточно воздушного охлаждения.

В ионных лампах, благодаря наличию в пространстве между катодом и анодом тяжелых, медленно движущихся положительных ионов, управление током осуществляется значительно медленнее, нежели в лампах с чисто электронным разрядом. Необходимо, чтобы после прохождения через ионную лампу импульса анодного тока на аноде этой лампы в течение нескольких десятков микросекунд было отрицательное напряжение. Иначе управляющая сетка не сможет вновь контролировать момент начала прохождения анодного тока.

Весь период переменного тока, вырабатываемого при помощи ионных вентиляей, обычно не может быть короче сотни микросекунд. Лампы, наполненные парами ртути, могут генерировать токи с частотой не выше нескольких килогерц.

Генераторы с электронными лампами чаще всего питаются выпрямленным током. В преобразователях с ионными лампами можно применять схемы, в которых управляемые ионные вентили одновременно производят и выпрямление питающего 50-периодного тока и преобразование его в ток повышенной частоты.

Существуют установки с ионными лампами на мощность до нескольких сотен киловатт. Такие установки хорошо зарекомендовали себя в течение многолетней эксплуатации. Однако необходимо признать, что масштаб внедрения ионных преобразователей в промышленную практику еще совершенно недостаточен. По своим ценным свойствам они должны бы были найти значительно более широкое применение.

Электронные генераторы сверхвысоких частот

В электронной генераторной лампе с управляющей сеткой можно обеспечить высокий к.п.д. лишь при условии, что время пролета электронов от катода до сетки значительно меньше длительности одного полупериода высокочастотного тока.

Существуют трехэлектродные лампы для частот выше 100 мгц, у которых сокращение времени пролета достигнуто за счет уменьшения расстояния между управляющей сеткой и катодом.

В трехэлектродных лампах вместо цилиндрических электродов часто применяются плоские (рис. 7). Катод имеет вид плоского или несколько выпуклого диска, над которым с очень малым зазором — иногда меньше одной десятой миллиметра — расположена управляющая сетка. Такую же плоскую форму, аналогичную форме катода и сетки, имеет медный анод.

Сверхвысокочастотные (СВЧ) триоды с плоскими электродами часто выполняются в керамической изоляционной оболочке, которая может быть изготовлена с высокой механической точностью и обеспечивает необходимую жесткость конструкции и строгое постоянство размеров между электродами.

В СВЧ триодах электроды являются составными частями колебательных контуров. Через вывод сетки проходит колебательный ток основного контура. Этот ток может в сотни раз превышать электронный ток катода. Вывод сетки делается кольцевым, чтобы обеспечить малое индуктивное и малое активное сопротивление.

Существуют такие керамические триоды, которые могут генерировать ток частотой порядка 1000 мгц (сантиметровые волны) при непрерывной мощности в несколько киловатт. При импульсной работе с длительностью импульса в несколько микросекунд керамические триоды развивают мгновенную мощность в сотни киловатт. Ведутся работы по созданию керамических генераторных триодов импульсного и непрерывного действия еще большей мощности.

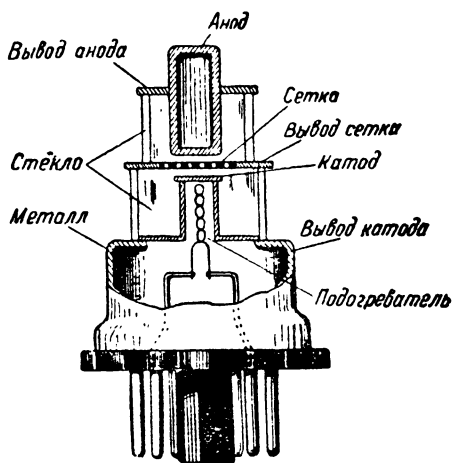


Рис. 7. Электронная трехэлектродная лампа с плоскими электродами.

Бóльшие мощности и более высокие частоты, чем от ламп с управляющими сетками, можно получить от разработанных в последние годы СВЧ генераторных приборов, в которых электронный поток разбивается на отдельные части (группируется), и отдает свою энергию при взаимодействии с системой колебательных контуров.

Электронные генераторы с группированным потоком создают электромагнитные колебания с частотой до 10^{11} гц — миллиметровые волны. К.п.д. этих генераторов, как правило, ниже 50%, а в самой высокочастотной части диапазона бывает и ниже 10%. Но, несмотря на этот сравнительно низкий к.п.д., такие генераторы применяются для слаботочных установок (в радиолокации, сигнализации, связи), а в некоторых случаях и для силовых устройств.

Существует большое разнообразие конструктивных форм СВЧ генераторов с группированным электронным потоком. Один из наиболее широко распространенных приборов, получивший исключительно широкое применение в радиолокации, — это многорезонаторный магнетрон.

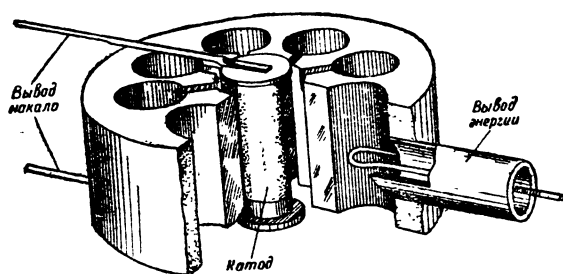


Рис. 8. Многорезонаторный магнетрон.

На рис. 8 показана схема конструкции одного из типов современного многорезонаторного магнетрона. Анод напоминает своими очертаниями статор машинного генератора переменного тока. В центральной области отверстия помещается катод. От центральной области отверстия идет ряд вырезов-пазов (от двух и до нескольких десятков). Каждый из этих пазов является колебательным контуром-резонатором. Собственная резонансная длина волны, на которой и работает магнетрон, обычно в 3—6 раз больше периметра одного резонатора.

Магнетрон при работе помещается в постоянное магнитное поле, силовые линии которого направлены параллельно оси катода. Потоки электронов, идущих от катода к аноду, закручиваются в магнитном поле и группируются в отдельные пучки — «спицы». Образно выражаясь, внутри анода магнетрона вращается «электронный ротор». Вращающееся облако электрон-

ного пространственного заряда возбуждает колебания в кольце резонаторов.

Другой распространенный тип СВЧ генератора — это клистрон (рис. 9).

Катод клистрона испускает поток электронов, длина которого больше его поперечника (подобный электронному лучу в приемной телевизионной трубке). Электроны этого потока ускоряются постоянным напряжением, а затем проходят сквозь электрическое высокочастотное поле, создаваемое колебательным контуром (полым резонатором). Скорости электронов при этом изменяются: электроны, пролетающие в течение одного полупериода, ускоряются, а пролетающие в течение другого полупериода замедляются.

Если такой модулированный по скорости электронный поток пролетает затем достаточно длинный путь (дрейфовый путь), то более быстро движущиеся электроны догоняют более медленно движущиеся, и электронный поток распадается на отдельные сгустки. В клистронах генераторного типа этот группированный электронный поток направляется затем в СВЧ колебательный контур, из которого происходит отбор энергии. Помимо двухконтурных клистронов, в которых первый контур модулирует электронный пучок, а второй отбирает из сгруппированного пучка энергию, для генерирования СВЧ применяются клистроны и с большим числом контуров. В некоторых конструкциях электроны после группировки подвергаются еще дополнительному ускорению высоким напряжением.

Многорезонаторные магнетроны и клистроны предназначены как для непрерывного генерирования, так и для импульсной работы. Максимальная мощность непрерывного генерирования в приборах обоих типов достигает десятков киловатт. При этом напряжении анодного питания у магнетронов берется порядка нескольких киловольт, а у клистронов более высокое — десятков киловольт.

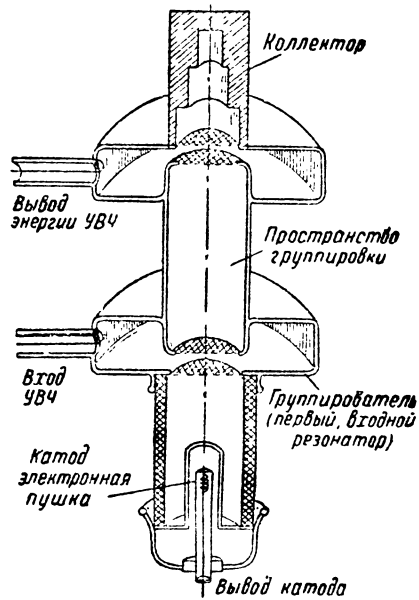


Рис. 9. Клистронный генератор сверхвысоких частот.

В импульсных приборах максимальная мощность на сантиметровых волнах достигает десятков тысяч киловатт. Для питания клистронов такой мощности необходим импульс постоянного тока с напряжением в сотни тысяч вольт.

Из других типов СВЧ генераторных приборов можно назвать лампы бегущей волны (ЛБВ) и лампы с обратной волной (ЛОВ). В этих приборах вместо сосредоточенных колебательных контуров имеются линии с распределенными постоянными, в которых скорость распространения электромагнитных колебаний согласована со скоростью рабочего электронного потока.

В последнее время ведутся работы над рядом новых конструкций генераторов СВЧ, например, над многолучевыми системами и т. д.

Применение в генераторах ТВЧ полупроводниковых приборов

Во время второй мировой войны в радиолокационной технике стали применять все более короткие волны: от метровых волн перешли к дециметровым, а затем сантиметровым. В то время не было приемных ламп, удовлетворительно работающих на таких коротких волнах. В радиолокационных приемниках сантиметровых волн начали применять кристаллические детекторы — сначала из кремния, а затем из германия.

Кремний и германий — элементы четвертой группы периодической системы Менделеева — по своей электропроводности занимают промежуточное место между металлами, хорошо проводящими электрический ток (проводниками) и окислами металлов, углеводородами и др. (диэлектриками).

Еще в конце прошлого века было установлено, что контакт полупроводника с металлом может обладать односторонней электропроводностью, работать в качестве детектора электромагнитных колебаний. Однако полупроводниковые (кристаллические) детекторы, применявшиеся на заре радиотехники, были неустойчивы и работали ненадежно.

Новые исследования свойств полупроводников, проведенные в последнее десятилетие, привели к поистине грандиозным сдвигам в этой области.

Было выяснено, что ничтожные добавки примесей меняют характер электропроводности. При одних примесях кремний и германий имеют электронную проводимость — *n*-тип проводимости (negative — отрицательный), при других так называемую дырочную проводимость — *p*-тип проводимости (positive — положительный). Монокристалл кремния или германия, в котором имеется переход от одного типа проводимости к другому — *p-n* — переход, работает как клапан, выдерживающий относительно высокие напряжения и допускающий огромные плотности тока. Если же в монокристалле кремния или герма-

ния сделать двойной переход, т. е. переход типа $n - p - n$ или $p - n - p$, то такой кристалл может работать как управляемый вентиль. Тонкий слой германия p между двумя слоями n -типа действует до некоторой степени подобно управляющей сетке в электронной лампе. Небольшая мощность во входной цепи изменяет внутреннее сопротивление кристаллического управляемого вентиля и позволяет управлять в выходной цепи мощностью, в сотни раз большей.

Характеристики полупроводниковых триодов (рис. 10) сильно отличаются от характеристик электронных ламп, и полупро-

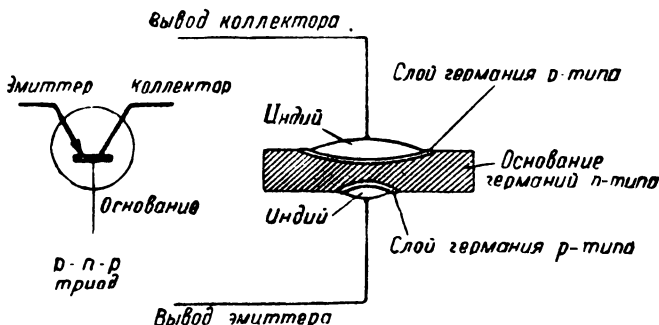


Рис. 10. Германиевый триод плоскостного типа: слева — условное обозначение; справа — схематический разрез.

водниковый триод не может быть просто включен в схему вместо электронной лампы. Но в соответствующих схемах полупроводниковые приборы могут выполнять все те функции, что и электронные лампы: усиливать переменные токи, преобразовывать постоянный ток в переменный высокочастотный.

Существуют конструкции германиевых и кремниевых диодов, которые выдерживают обратное напряжение до 400 в и пропускают токи в десятки ампер. Эти выпрямители отличаются высоким к.п.д. (потери меньше одного процента) и большой удельной мощностью (до киловатта на 1 см³ активного объема). Кроме того, к.п.д. этих вентилях не падает вплоть до относительно высоких частот.

Современные управляемые полупроводниковые вентиля (кристаллические триоды, тетроды) строятся пока на относительно малые мощности — до сотни ватт. На рис. 11 показана схема генератора ТВЧ на полупроводниковом управляемом вентиле.

Полупроводниковые приборы сравнительно широко применяются в слаботочной высокочастотной технике. Современные полупроводниковые маломощные триоды имеют объем порядка нескольких кубических миллиметров. Они обладают высокой механической прочностью — не боятся ударов и вибраций. Срок их службы при нормальных условиях эксплуатации —

десятки тысяч часов. Отсутствие накаливаемого катода резко снижает потребляемую мощность по сравнению с электронными лампами.

Приемные и усилительные устройства с полупроводниковыми приборами имеют значительно меньшие габариты, более экономичны, более надежны, чем подобные устройства с электронными лампами. Особенно ценно применение полупроводниковых приборов в быстродействующих электронных вычислительных машинах, где количество одновременно работающих вентилях (как неуправляемых, так и управляемых) измеряется многими сотнями и даже тысячами.

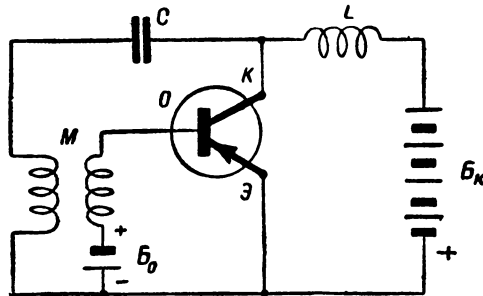


Рис. 11. Принципиальная схема генератора ТВЧ на полупроводниковом управляемом вентиле.

Для создания более мощных полупроводниковых управляемых вентилях необходимо еще решить ряд сложных технологических проблем.

Известны схемы включения полупроводниковых приборов, в которых одновременно могут работать много сотен отдельных элементов. Комбинируя в таких схемах маломощные элементы, можно получать суммарные большие мощности, подобно тому, как получают большие мощности в паровых турбинах при малой сравнительно нагрузке на каждую отдельную лопатку.

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ НАГРЕВ

Порыв ветра поднимает пыль, крутит ее в вихре. Так и электромагнитная волна, пронизывая любое вещество, любую конструкцию, заставляет двигаться в вихре свободные электроны в проводниках, раскачивает, колеблет ионы и молекулы в изоляционных материалах. Чем быстрее движутся частицы вещества, тем выше его температура. При помощи электромагнитных волн — токов высокой частоты — в принципе можно нагреть любой материал до любой температуры.

В первые годы развития техники ТВЧ (в конце прошлого и в начале нашего века) стоимость высокочастотной энергии бы-

ла весьма велика. Нагрев при помощи ТВЧ находил очень ограниченное применение. В частности, он применялся для плавки драгоценных металлов и сплавов. В связи с развитием электровакуумной промышленности начали применять индукционный нагрев в магнитном поле ТВЧ для обезгаживания металлических деталей радиоламп внутри их стеклянных баллонов в процессе откачки воздуха.

В тридцатых годах во многих лабораториях СССР были начаты опыты по использованию ТВЧ в металлообрабатывающей промышленности для закалки, пайки, штамповки, а также в различных других отраслях промышленности, например, для тепловой обработки различного рода пластмасс и электроизоляционных материалов, для сушки и т. д.

В настоящее время основное количество высокочастотной энергии используется для промышленного нагрева. На многих заводах работают высокочастотные нагревательные установки мощностью в сотни киловатт. Установленная высокочастотная мощность на некоторых заводах достигает тысяч киловатт.

Конструкция нагревателя ТВЧ зависит от особенностей технологического процесса, от размеров и формы нагреваемых объектов, от электрофизических характеристик материала объекта (удельное электросопротивление ρ , диэлектрическая проницаемость ϵ и магнитная проницаемость μ), от вида нагрева (равномерный сплошной, поверхностный зональный, глубинный зональный). Конструкция нагревателя ТВЧ также зависит от отношения размеров нагревателя к длине волны.

На рис. 12 показаны некоторые типичные конструкции нагревателей ТВЧ. Как видно из рисунка, диапазон частот, применяемых для нагрева ТВЧ, чрезвычайно широк (от 50 герц до миллиарда герц). Чем больше размеры нагреваемого объекта и чем выше электропроводность материала, тем более низкие частоты могут быть применены для нагрева, и, наоборот, чем выше электросопротивление, чем меньше габариты нагреваемых объектов, тем выше должна быть частота тока.

Нагрев металлов

Основной материал в современном машиностроении — это сталь. Медленно охлажденная сталь легко поддается различным видам обработки (резанью, штамповке и т. п.). Если же стальное изделие нагреть до высокой температуры, а затем резко охладить, то сталь становится твердой — закаленной.

Закаленная сталь хорошо противостоит износу, истиранию. Но одновременно с повышением твердости стали увеличивается ее хрупкость. При резких толчках и ударах закаленные изделия ломаются. Машиностроителям необходим такой материал, который имел бы вязкую сердцевину и твердую, износостойчивую поверхность.

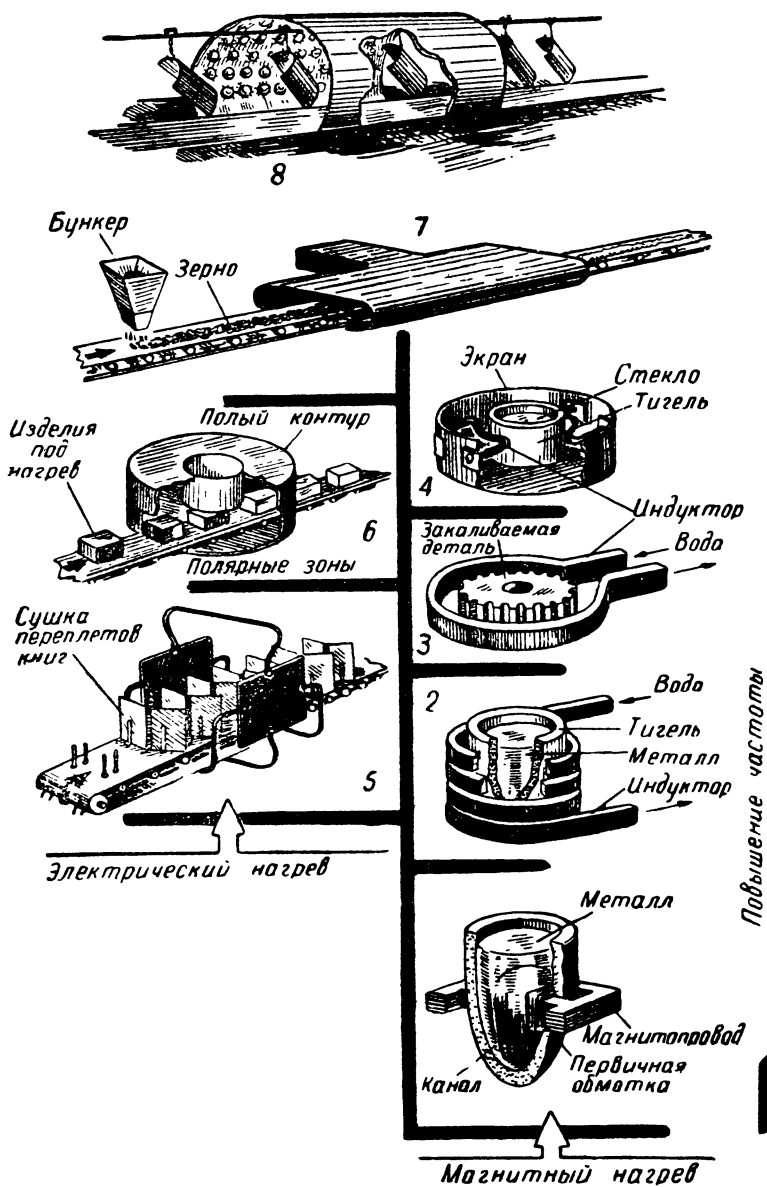


Рис. 12. Различные типы нагревателей ТВЧ.

Пояснение к рис. 12: В правой части рисунка показаны нагреватели, в которых действует магнитное поле. Эти нагреватели применяются для хорошо электропроводных материалов (металлы, графит, некоторые растворы и расплавы). Слева показаны нагреватели, в которых действует электрическое поле. Они предназначены для материалов с высоким электросопротивлением (полупроводники, изоляторы). Внизу рисунка — самые низкочастотные нагреватели; вверху — самые высокочастотные нагреватели.

1 — Индукционная печь, работающая на частоте 50 гц. Чтобы при этой низкой частоте обеспечить хорошую магнитную связь между первичной обмоткой печи (индуктором) и нагреваемым металлом, печь снабжена стальным сердечником, который охватывается каналом с расплавленным металлом. Индукционные печи со стальным сердечником строятся до мощность от десятков до сотен киловатт и на емкость до нескольких тонн. В этих печах плавят преимущественно цветные металлы (медь, алюминий, различные сплавы).

2 — Индукционная бессердечниковая печь (частота тока от 500 гц до нескольких мегагерц). Объем тигля бывает от нескольких кубических миллиметров (для садок весом в доли грамма) до сотен литров (для садок весом в несколько тонн). Тигли бывают графитовые, например, для плавки германия и выращивания из германия монокристаллов (для изготовления полупроводниковых выпрямителей и усилителей). Часто применяются тигли из окиси кремния, окиси алюминия, магнезия, циркония и других неэлектропроводных соединений. В таких тиглях выплавляют различные металлы и сплавы, например, магнитные и жаростойкие сплавы.

3 — Индуктор для поверхностного нагрева под закалку (частота тока от нескольких килогерц до нескольких мегагерц). Напряжение на закалочных индукторах обычно применяется более низкое (до одного киловольта), чем на индукторах плавильных печей. Плотность тока бывает весьма большой — сотни ампер на 1 м² активного сечения проводника индуктора. Закалочные индукторы работают с интенсивным водяным охлаждением.

Показан простейший одновитковый индуктор для нагрева боковой поверхности дисковых изделий. В некоторых случаях, чтобы получить требуемую конфигурацию закаленной зоны, применяются индукторы сложной конструкции, иногда с магнитопроводами из высококачественных ферромагнитных материалов (оксиферов).

4 — Установка для индукционной плавки стекла. Электропроводность стекла даже при самой высокой температуре много меньше электропроводности металлов. Для нагрева стекла необходимо индуктировать в нем более высокие напряжения, чем в металле. Поэтому применяются частоты от единиц до десятков мегагерц. Для предотвращения излучения и рассеяния энергии индуктор окружается электромагнитным экраном из меди или алюминия.

5 — Устройство для нагрева в высокочастотном электрическом поле. Между конденсаторными обкладками движется транспортер с объектами, подлежащими нагреву. Для нагрева в электрическом поле применяются частоты не ниже нескольких мегагерц.

Показана установка для сушки книжных переплетов, коробок и т. п. изделий.

6 — Нагреватель в виде полого колебательного контура. Электромагнитная энергия колеблется внутри объема, ограниченного медной оболочкой. Полые контуры применяются для частот от нескольких десятков мегагерц и выше.

В подобных устройствах сушат литейные шихты и нагревают пластмассовые заготовки перед прессовкой.

7 — Нагреватель в виде волновода, в котором действуют одновременно и электрические и магнитные силы (частота тока миллиарды герц).

В таких волноводах может производиться конвейерная сушка различных сыпучих материалов, сушка материалов, вырабатываемых в виде лент, полос, нагрев тонкой проволоки для отжига, эмалирования.

При дальнейшем повышении частоты переходим от нагревателей ТВЧ к нагревателям инфракрасным излучением. Для получения теплового излучения уже не нужны электронные генераторы. Тепловые лучи испускаются нагретыми поверхностями.

8 — Установка с лампами инфракрасного излучения для сушки лаковых покрытий.

Так производят сушку многочисленных типов изделий: кузовов автомашин, холодильников и т. д.

Нагрев ТВЧ позволяет просто и дешево производить поверхностное упрочнение стали. Индуктированные токи высокой частоты циркулируют только в тонком поверхностном слое стали. Если производить нагрев изделия ТВЧ достаточно быстро (время нагрева в секундах должно быть не больше квадрата толщины слоя в миллиметрах), то будет закален только поверхностный слой, а середина останется вязкой и, следовательно, изделие не будет хрупким.

Благодаря тому, что при поверхностной закалке нагревается только небольшая часть всего объема изделия, электроэнергии расходуется меньше, чем при старых методах сплошного нагрева.

Многие важные детали автомобилей, тракторов, металлорежущих станков и различных других машин и механизмов теперь закаливают токами высокой частоты.

В современной технике широко применяются высокочастотные плавильные печи. В таких печах выплавляют многие высококачественные сорта стали, магнитные и жаростойкие сплавы. Часто плавка производится в пространстве с разреженным газом (в высоком вакууме). При вакуумной плавке и отливке получаются металлы и сплавы наивысшей чистоты.

Путем нагрева ТВЧ можно производить высококачественную скоростную пайку различными припоями. Такой способ пайки применяется в инструментальном производстве для крепления пластинок твердых сплавов в державках (в одно- и многолезвийном инструменте: резцы, фрезы, зубки для врубовых машин, бойки отбойных молотков, шарошки для буров).

Нагрев ТВЧ в последние годы проникает даже в такие области, как, например, зубопротезная техника. Здесь применяется высокочастотная плавка в сочетании с центробежной отливкой, высокочастотная пайка и сварка.

Особенно широко ТВЧ применяются при нагреве заготовок для обработки стали давлением: штамповки,ковки, накатки. На многих предприятиях успешно работают «высокочастотные индукционные кузницы». Нагрев ТВЧ снижает образование окалины. Это позволяет экономить металл, увеличивает срок службы штампов, улучшает качество поковок. Облегчается и оздоравливается труд рабочих кузнечного цеха.

Удельный расход электроэнергии при индукционном нагреве стальных кузнечных заготовок до 1200° составляет примерно 800 кВт-ч на тонну.

На рис. 13 дана схема установки с ламповым генератором для индукционного нагрева металлов. Пунктирными линиями на рисунке выделены основные части установки, а внизу показаны кривые напряжений и токов, циркулирующих в соответствующих местах установки.

К трансформатору *З* подводится трехфазный ток частотой 50 гц и напряжением 220 или 380 в. Напряжение повышается до 6—10 кв и поступает в выпрямитель (*II*). К генератору (*III*) подводится уже выпрямленное напряжение 8—13 кв. (*IV*) — промежуточный колебательный контур; в нем поступающие от генераторной лампы импульсы превращаются в синусоидальные колебания. Расстояние между катушкой колебательного контура *15* и катушкой связи *17* может плавно меняться. Таким образом можно плавно менять напряжение, подводимое к нагревательному контуру (*V*), и, следовательно, плавно менять мощность, вводимую в нагреваемое изделие. Вместо закалочного трансформатора *18* к катушке связи *17* можно подключать плазменную печь.

В последнее время в выпрямителях установок ТВЧ вместо газотронов ставят тиратроны. Это дает возможность плавно регулировать и стабилизировать выпрямленное напряжение, подводимое к генераторной лампе.

Нагрев полупроводников и диэлектриков

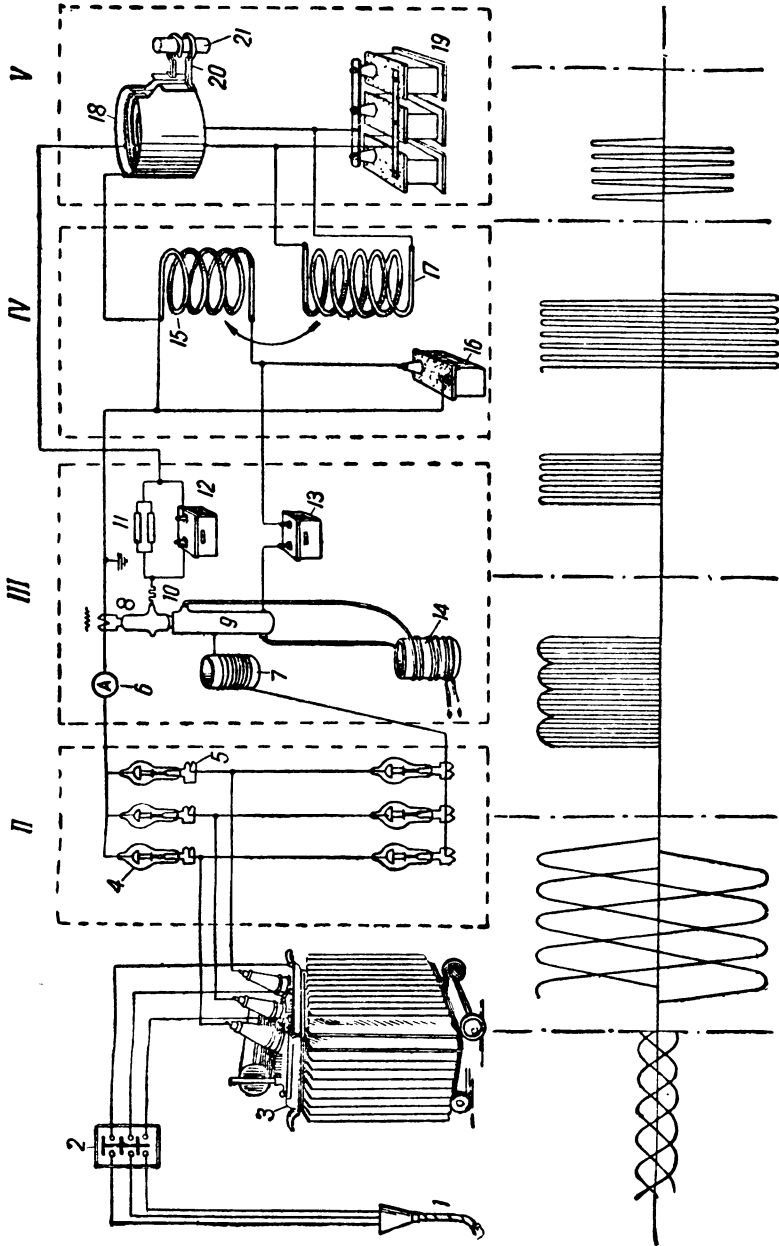
К веществам, плохо проводящим (полупроводникам) и почти не проводящим электрический ток (диэлектрикам), может быть отнесено множество материалов. Нагрев ТВЧ таких материалов применяется в самых разнообразных технологических процессах.

На заводах пластмассовых изделий заготовки нагревают в установках ТВЧ перед прессовкой, производят вулканизацию самых разнообразных резиновых изделий.

Нагрев ТВЧ применяется также при склеивании различных изделий. Многослойные небьющиеся стекла с прокладками между слоями стекла термопластичной пленки (например, бутварной) для защитных очков, остекления самолетов и автомобилей изготавливают прессованием с применением нагрева ТВЧ. При выработке некоторых сортов фанеры и фасонных деталей из нее древесину также нагревают ТВЧ.

Для сварки швов в изделиях из тонких листов пластмасс применяют специальные устройства ТВЧ, напоминающие швейные машины. При помощи этих устройств изготавливают чехлы, футляры, коробки, трубы.

Одно из старейших применений нагрева ТВЧ — это сушка.



Пояснение к рис. 13: Трехфазный ток с частотой 50 гц из силовой сети (1) через выключатель (2) поступает в трансформатор (3), где его напряжение повышается до 8 кв. Газотроны (4) преобразуют переменный ток высокого напряжения в постоянный. Катоды газотронов накаливаются трансформаторами (5). Отрицательный полюс газотронного выпрямителя подводится через амперметр (6) к катоду генераторной лампы (9). Положительный полюс подводится к аноду генераторной лампы. В цепи положительного провода имеется так называемый стопорный дроссель (7), назначение которого не пропускать ток высокой частоты от генераторной лампы обратно в выпрямитель и в питающую сеть трехфазного тока. Трансформатор (8) служит для накала катода генераторной лампы. Средняя точка накаливной обмотки этого трансформатора заземлена. Генераторная лампа «рубит» подводимый к ней постоянный ток на отдельные порции — импульсы. От одной пятой до одной трети подводимой к генераторной лампе мощности выделяется на ее аноде в виде тепла. Анод лампы охлаждается проточной водой, которая подается по резиновым трубкам (14). Так как на аноде лампы высокое напряжение, то длина резиновых трубок должна быть не менее 10 метров, иначе по ним будет происходить утечка тока. С анодом генераторной лампы соединен разделительный конденсатор (13). Он не пропускает постоянного тока, но легко проводит импульсы высокой частоты в колебательный контур, состоящий из индуктивности (15) и конденсатора (16). При помощи катушки связи (17) высокочастотное напряжение подается на первичную обмотку воздушного трансформатора (18). К этой обмотке присоединена конденсаторная батарея (19). Вторичная обмотка высокочастотного воздушного трансформатора соединяется с нагревательным индуктором (20). Быстропеременное электромагнитное поле индуктора возбуждает вихревые токи в стальном валике (21). Эти вихревые токи нагревают поверхностный слой валика до требуемой температуры.

От трансформатора (18) обратно к сетке генераторной лампы подается высокочастотное напряжение — положительная обратная связь. Напряжение обратной связи управляет прохождением анодного тока так, чтобы импульсы анодного тока попадали в такт с собственными колебаниями высокочастотного контура (15—16).

В сетку лампы включено «антипаразитное сопротивление» (10), подавляющее нежелательные («паразитные») колебания, которые могут возникнуть в генераторной лампе. Кроме того, в сетку лампы включены соединенные параллельно сопротивление (11) и конденсатор (12). Эту комбинацию называют «гридликом»; она улучшает режим работы лампы, повышает ее к.п.д.

Однако электрический ток, особенно ТВЧ, — дорогой энергоноситель. При сушке ТВЧ расход электроэнергии может достигать 1 квт-ч на каждый килограмм испаренной влаги. Поэтому сушку ТВЧ целесообразно применять только при изготовлении дорогой продукции и когда общее количество удаляемой влаги невелико. Обычно стараются комбинировать сушку ТВЧ с другими способами (пар, горячий воздух).

Существуют установки ТВЧ для стерилизации консервов. Благодаря тому, что весь процесс нагрева закупоренной банки продолжается не более минуты, получаются консервы высокого качества. Консервы могут быть изготовлены даже из таких нежных ягод, как клубника, которая при этом не теряет своего аромата.

Последние годы все шире применяется нагрев ТВЧ в стекольном производстве как при сварке различных стеклянных

изделий (труб, пустотелых блоков), так и при варке стекла из шихты.

Специфическая особенность стекла и ему подобных материалов (силикатов) состоит в том, что с изменением температуры резко меняется их электросопротивление.

В начале этого раздела мы сравнивали электрические токи, возбуждаемые переменными электромагнитными полями, с обыкновенными вихрями. Известно, что на вихревом движении основана работа центробежных насосов. Конструкция насоса зависит от вязкости и плотности той жидкости или газа, для перекачивания которых он предназначен.

Конструкции нагревателей ТВЧ (индукторов, обкладок, антенн), которые должны возбуждать электронные вихри, зависят от электрических характеристик нагреваемых материалов.

При одной и той же мощности центробежный насос, перекачивающий легкую подвижную среду, должен работать с большей скоростью и иметь большие поверхности рабочих лопаток, нежели насос, который должен гнать тяжелую и вязкую среду.

Индуктор для материалов с высокой электропроводностью должен создавать в объекте большой ток при относительно низком напряжении. Такой индуктор можно сравнить с насосом для легких подвижных сред. В малоэлектропроводных материалах, наоборот, даже при высоком напряжении ток имеет малую силу. Нагреватель для таких материалов можно сравнить с насосом для плотных, вязких сред.

Представьте, что требуется создать центробежный насос, который хорошо качал бы и воздух и вязкую смолу. С подобными затруднениями приходится сталкиваться при конструировании некоторых видов нагревателей ТВЧ, например, для стекла и других силикатных материалов.

Электропроводность стекла резко меняется с температурой: холодное стекло — это материал с высоким электросопротивлением — изолятор, а в нагретом состоянии стекло проводит электрический ток так же хорошо, как электролиты, которыми заправляют аккумуляторы.

Можно построить такой нагреватель ТВЧ, в котором действуют одновременно и магнитное и электрическое быстропеременное поле. Пока электросопротивление нагреваемого материала велико — энергия передается электрическим полем; при низком электросопротивлении энергию передает магнитное поле. Подобный нагреватель может согласовывать сопротивление нагрузки с характеристиками генераторов ТВЧ, даже если электросопротивление этой нагрузки в процессе нагрева изменяется в тысячи раз.

Электромагнитный луч-резец

Известно, что быстрый местный нагрев хрупких материалов вызывает их разрушение, растрескивание. Так трескается

стакан толстого стекла, если в него плеснуть кипятком. Под действием солнечных лучей могут разрушаться скалы. Максимальная мощность, которую несут с собой солнечные лучи (в тропиках в знойный полдень), достигает 2 кВт на квадратный метр. Если бы напряженность светового поля можно было измерять в вольтах, это соответствовало бы примерно 10 в на сантиметр. При помощи электромагнитных волн метрового диапазона можно достигнуть концентрации энергии в десятки раз более высокой, чем энергия солнечных лучей, а применяя дециметровые и сантиметровые волны, можно достигнуть еще более высоких концентраций электромагнитной энергии — в десятки тысяч киловатт на квадратный метр.

При таком интенсивном нагреве будет происходить быстрое растрескивание, разрушение многих материалов.

Нагрев ТВЧ является избирательным: одни компоненты сложной горной породы нагреваются сильнее, чем другие. Поэтому трещины проходят не беспорядочно, а по границам различных компонентов. ТВЧ можно использовать для обогачительных процессов — отделения полезных ископаемых от сопутствующего им балласта.

Высокочастотный метод разрушения можно сочетать с механическим и гидравлическим разрушением. Таким образом могут быть созданы новые типы машин для прохождения горных выработок в весьма крепких породах. Такие машины мыслятся в виде системы направленных ультракоротковолновых излучателей, обращенных к забою, и механических органов типа, например, шарошек, которые катятся по облученной и тем самым ослабленной поверхности породы и разрушают ее.

Электрофизические свойства горных пород отличаются большим разнообразием. Многие руды металлов, в частности железные руды, обладают значительной электропроводностью. Нагрев и разрушение подобных материалов могут производиться относительно низкими частотами. Горные породы, состоящие в основном из кварца, слабо поглощают электромагнитные волны. Для этих пород нужны более высокие частоты, более интенсивные электромагнитные поля.

НЕКОТОРЫЕ ДАЛЬНЕЙШИЕ ТЕНДЕНЦИИ И ВОЗМОЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ ТВЧ

Согласно определению Д. И. Менделеева, технология — это учение о выгодных (т. е. поглощающих наименее людского труда) приемах переработки природных продуктов в продукты потребные (необходимые, или полезные, или удобные). Технологические приемы и методы непрерывно изменяются, развиваются, совершенствуются. Основная тенденция развития всех современных технологических процессов — это стремление к максимальной автоматизации, к созданию самодействующих линий,

цехов и, наконец, полностью автоматических заводов, выпускающих продукцию с наименьшей затратой человеческого труда.

Высокочастотные методы открывают много новых возможностей для автоматизации.

Нагрев ТВЧ во многих случаях легче автоматизировать, чем другие виды нагрева. Представляют интерес высокочастотные методы контроля и управления различными технологическими процессами. При помощи высокочастотных вихревых токов можно контролировать толщину покрытий на различных предметах, обнаруживать трещины и другие дефекты в металлических изделиях, металлические включения в неметаллических объектах. По измерению высокочастотных электрических характеристик (ρ, ϵ, μ), можно косвенным путем определять различные другие параметры процессов (влажность, температуру, химический состав).

Высокочастотные электрические токи применяются для получения высокочастотных механических колебаний, называемых обычно ультразвуковыми (так как их частоты лежат выше диапазона частот слышимых звуков, т. е. выше 10 кгц). Эти колебания применяются для дефектоскопии, для образования и разделения эмульсий, для ускорения процессов диффузий, для пайки, сверления и других целей¹.

Конечно, как и во всяком деле, при внедрении высокочастотных методов не обходится без увлечений и разочарований. В некоторых случаях аппаратура ТВЧ оказывается слишком сложной, а энергия ТВЧ слишком дорогой для технологических применений. В ряде случаев затруднения возникают вследствие того, что сложные закономерности высокочастотных явлений переплетаются с тонкостями технологических процессов. Здесь открывается огромное поле деятельности для исследовательских работ.

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ТРАНСПОРТ

В конце прошлого века были сделаны первые предложения передавать электрическую энергию подвижному составу транспорта от центральной станции на расстояние без проводов при помощи ТВЧ. Такому бесконтактному методу централизованного энергоснабжения противопоставлялись идеи транспорта со сверхлегкими электрическими аккумуляторами, а впоследствии — с ядерными двигателями.

Но реальных путей к созданию сверхлегких электрических аккумуляторов до сих пор нет. В существующих же аккумуляторах (свинцовых, железо-никелевых) на единицу веса приходится запас энергии в сотни раз меньший, чем в обычном горючем (например, бензине).

¹ Подробное рассмотрение механических высокочастотных колебаний дано в ряде книг и брошюр по ультразвуку.

Действие ядерных реакторов связано с интенсивным ионизирующим излучением. Биологическая защита ядерного реактора неизбежно получается тяжелой и громоздкой. Ядерный реактор может быть установлен на крупном надводном или подводном судне, но уже для железнодорожного транспорта целесообразно использование ядерного локомотива вызывает сомнение — столь громоздкой, неудобной и опасной в эксплуатации получается конструкция. Для безрельсового же транспорта, как для самых больших, так и тем более для маленьких машин, ядерные реакторы или какие-нибудь ядерные аккумуляторы неприменимы.

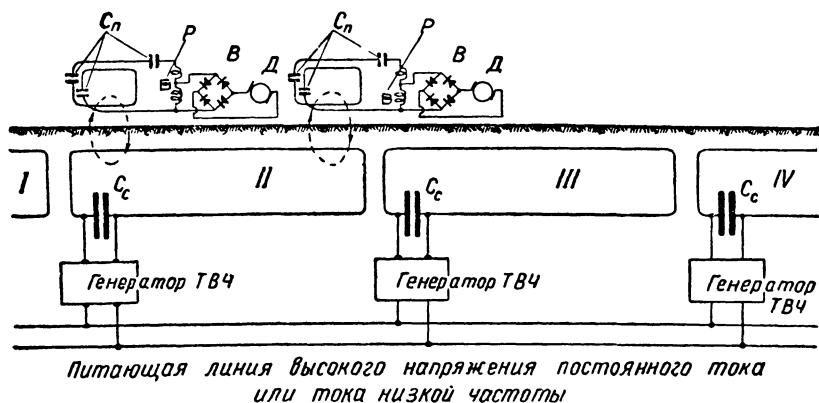


Рис. 14. Схема энергоснабжения высокочастотного транспорта: I—IV — отдельные участки подземной бесконтактной тяговой сети. C_c — конденсаторные батареи, обеспечивающие циркуляцию реактивного тока. Генераторы ТВЧ, питающие отдельные участки бесконтактной сети, включаются в работу только тогда, когда над данным участком есть потребитель энергии.

Над участком II показаны две машины. Пунктиром показаны магнитные силовые линии, сцепляющие проводники приемных контуров с проводниками бесконтактной сети. C_n — конденсаторы приемного контура. P — регулятор мощности. B — выпрямитель, превращающий высокочастотный ток в постоянный, необходимый для питания тягового двигателя D .

Мечты об автомашинах, которые при изготовлении на заводе будут снабжаться «таблеткой ядерного горючего», обеспечивающей многолетнюю работу машины, не имеют под собой реальной почвы.

Наиболее перспективным видом легкого наземного транспорта будущего остается высокочастотный транспорт — ВЧТ.

В 1943 году автором была сооружена первая экспериментальная установка ВЧТ. На рис. 14 показана принципиальная схема ВЧТ.

Вдоль дороги протягивается бесконтактная сеть. Это может быть подвешенная над дорогой воздушная сеть, или подземная сеть (кабельная или из проводников в каналах). Эта сеть

является первичной обмоткой высокочастотного трансформатора. На машинах устанавливаются приемные витки — вторичные обмотки трансформаторов. Они настраиваются в резонанс с частотой тока в сети при помощи конденсаторных батарей.

Бесконтактная сеть создает над дорогой зону, насыщенную электромагнитной энергией. Магнитные силовые линии связывают между собой проводники сети и приемных контуров на машинах. При помощи электромагнитной индукции передача энергии может происходить с достаточно высоким к.п.д. на расстоянии, не превышающем ширину бесконтактной сети. Практи-

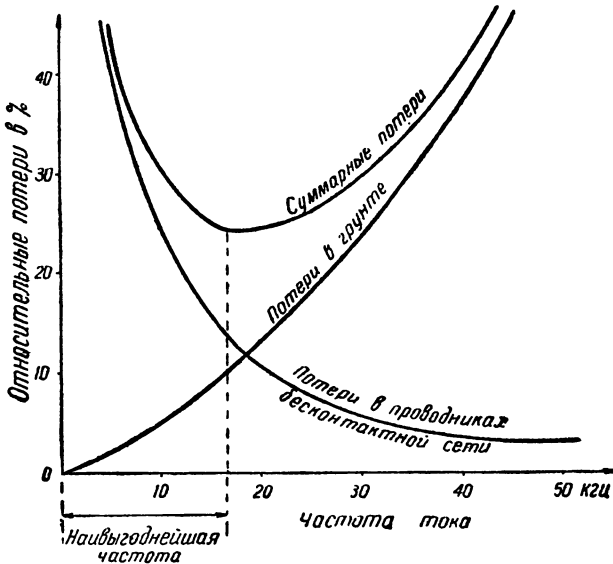


Рис. 15. График зависимости относительных потерь энергии от частоты тока при передаче от подземной бесконтактной сети.

чески при ВЧТ бесконтактная передача энергии происходит на расстояние в несколько метров (но в некоторых специальных случаях это могут быть и десятки метров).

К.п.д. передачи от бесконтактной сети к приемным контурам зависит от частоты тока. С повышением частоты тока уменьшаются потери в проводниках, но возрастают потери в окружающей среде — на паразитные вихревые токи в грунте, на излучение. На рис. 15 показан график зависимости относительных потерь энергии от частоты тока при передаче от бесконтактной подземной сети. Существует оптимальная частота, при которой бесконтактная передача энергии происходит с наименьшими потерями. Эта частота зависит от конструкции бес-

контактной сети, от электрических характеристик окружающей среды; она может находиться в пределах от нескольких килогерц до нескольких десятков килогерц. Если на машине высокочастотного транспорта установить небольшой аккумулятор, то она сможет отъезжать на несколько километров от энергизованной зоны.

В качестве аккумулятора может быть применен быстро вращающийся маховик, соединенный с электрической машиной. При заряде эта машина работает как двигатель, получая энергию от высокочастотной сети, скорость маховика при этом увеличивается. При разряде, наоборот, маховик ведет машину; она



Рис. 16. Экспериментальный грузовой электромобиль с высокочастотным энергопитанием. Приемный контур расположен внизу под машиной. Бесконтактная сеть натянута на столбиках с изоляторами вдоль дороги.

работает в генераторном режиме и питает ток тяговый двигатель. Маховичный аккумулятор допускает многочисленные кратковременные заряды и разряды. Энергоемкость его не ниже, чем, например, у свинцовых аккумуляторов. Маховичный агрегат весом в 100 кг может обеспечить передвижение небольшой машины на несколько километров.

Если в городе проложить даже относительно редкую сетку высокочастотных магистралей, то машины ВЧТ смогут передвигаться во всех направлениях. На рис. 16 показан экспериментальный грузовой автомобиль с высокочастотным питанием.

В течение последних лет в СССР был выполнен ряд экспериментальных установок ВЧТ. В частности, несколько месяцев работала на одной из шахт Донбасса подземная линия ВЧТ для откатки угля.

АТАКА АТОМНОГО ЯДРА

В начале тридцатых годов в лаборатории Резерфорда в Англии впервые было осуществлено искусственное превращение ядер атомов. Литий — один из самых легких элементов периодической системы Менделеева — бомбардировали ядрами водорода. В результате «прямых попаданий» каждое ядро лития раскалывалось на два ядра гелия. Ядра водорода, которыми обстреливали литиевую мишень, получали разгон — ускорялись — при помощи высокого электрического напряжения — около полмиллиона вольт. Для этого применялась стеклянная трубка, из которой тщательно выкачивали воздух (создавали внутри трубки «высокий вакуум»). К концам трубки прикладывали электрическое напряжение. В положительно заряженный конец вакуумной трубки впускали поток водородных ядер. Под действием электрического напряжения водородные ядра летели к отрицательно заряженному концу трубки, приобретая скорость в несколько тысяч километров в секунду.

Расчеты показывали, что для проведения ядерных реакций с более тяжелыми, чем литий, элементами необходимо для бомбардировки применять атомные частицы с более высокими энергиями — частицы, ускоренные до более высоких электрических напряжений (больше чем миллион вольт).

Во всех физических и электротехнических лабораториях мира, где только работали с электровакуумными приборами и высоким электрическим напряжением, обсуждались вопросы получения ускоренных частиц высоких энергий. Во многих лабораториях начались теоретические и экспериментальные исследования по созданию новой аппаратуры для атаки атомного ядра.

Были два принципиально различных метода. Один — это строить все более и более высоковольтные источники электрического напряжения — образно выражаясь, строить все более и более высокие электрические горы, чтобы с них скатывать ядра для атомной бомбардировки. Второй метод — это вовсе отказать от сверхвысоких электрических напряжений, а ускорять частицы многими согласованными толчками высокочастотного напряжения, подобно тому, как раскачивают качели или тяжелый колокол. Этот высокочастотный метод ускорения оказался наиболее плодотворным для атаки атомного ядра.

В лаборатории ленинградского электровакуумного завода «Светлана» мы мечтали создать ускоритель, в котором бегущая внутри медной трубы электромагнитная волна несла бы с собой порции заряженных частиц, непрерывно ускоряя их. Нас увлек

рассказ Джека Лондона об островитянах Тихого океана, которые катались на вздыбленных волнах морского прибоя.

«...Подобный легендарному божеству, туземец с венком на голове, уловив момент, бросал доску на скат волны и, прыгнув на нее, стоя скатывался с водяной горы, а волна все бежала вперед и несла его все скорей и скорей...»

Так и электромагнитная волна понесет на своих скатах порции заряженных частиц, все ускоряя и ускоряя их, думали мы. В других лабораториях пытались закручивать заряженные частицы в электромагнитном вихре. Предлагались ускорители, в которых заряженные частицы двигались по спирали внутри металлической коробки между двумя электродами. К электродам было приложено высокочастотное напряжение.

Все эти типы ускорителей — с волной, бегущей в трубе, с электромагнитным вихрем, с движением частиц по спиральным или кольцевым путям — характерны тем, что в них на заряженные частицы воздействуют тем или иным способом токи высокой частоты. Частота тока согласуется (поддерживается в резонансе, как говорят физики) с движением ускоряемых частиц. Поэтому подобные ускорители называются резонансными.

Методы резонансного ускорения заряженных частиц стремительно развивались и совершенствовались. Быстрый прогресс ускорителей заряженных частиц позволил получить данные о структуре ядер атомов, перейти к практическому использованию ядерной энергии.

В послевоенные годы разработка и строительство высокочастотных резонансных ускорителей заряженных частиц получает особенно большой размах. При дальнейшем изучении структуры атомных ядер (а без такого изучения немислимы дальнейшие успехи в деле практического использования ядерной энергии) необходимо, чтобы для бомбардировки ядер применялись частицы, ускоренные до сверхвысоких электрических напряжений — уже не в миллионы, а миллиарды вольт.

За короткий срок резонансные ускорители из скромных стеклянных трубок, изготовлявшихся кустарным способом в физических лабораториях, выросли в гигантские сооружения. На рис. 17 показаны принципиальные схемы высокочастотных резонансных ускорителей заряженных частиц.

Следует подчеркнуть, что современные методы резонансного ускорения заряженных частиц не являются изобретением отдельных лиц или отдельных лабораторий. Создание современных резонансных высокочастотных ускорителей — это результат напряженного творческого труда сотен ученых и инженеров.

Недавно были опубликованы данные об одном из величайших ускорителей мира — советском синхрофазотроне, который будет способен сообщать заряженным частицам энергию до 10 млрд. электроновольт.

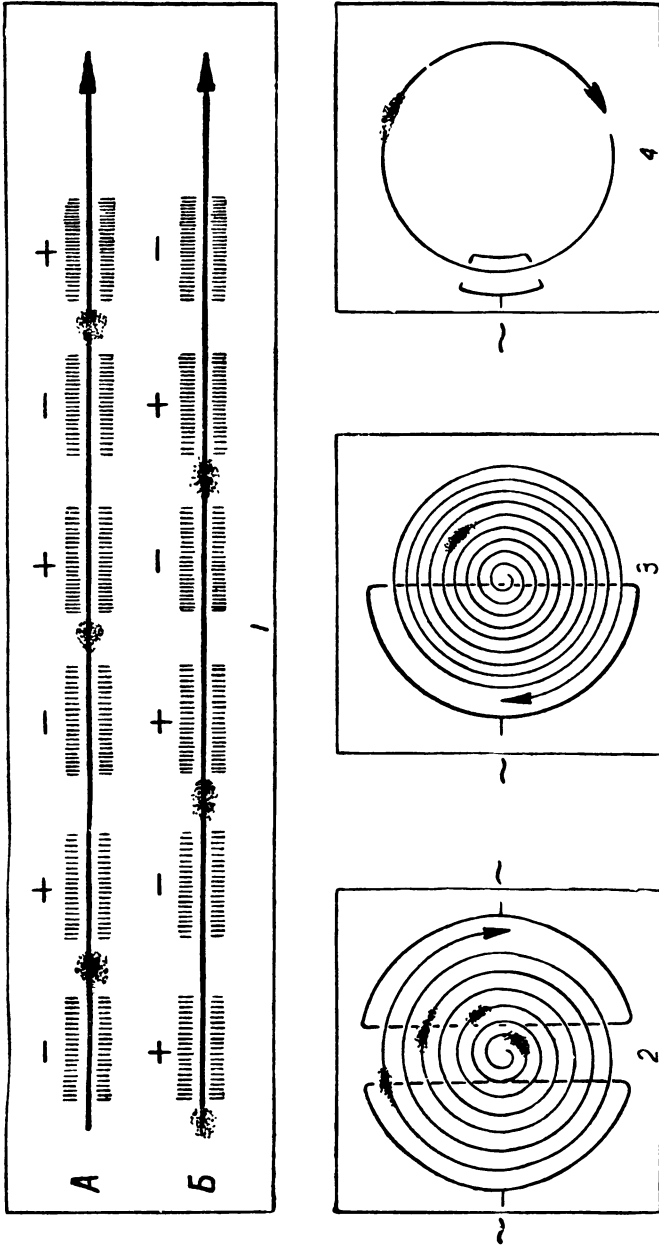


Рис. 17. Высокочастотные резонансные ускорители заряженных частиц.

Пояснение к рис 17: 1—Линейный резонансный ускоритель. Этот ускоритель выполнен в виде прямолинейной трубы. В ней имеется система электродов, соединенных с генератором ТВЧ. Между электродами действует высокочастотное ускоряющее напряжение. Таким методом можно ускорять и положительно заряженные частицы — ядра атомов, и отрицательно заряженные частицы — электроны. На рисунке показано ускорение электронов, которые движутся от отрицательных электродов к положительным.

Частота ускоряющего напряжения, длина электродов и скорость движения заряженных частиц так согласованы, что пока ступок электронов пролетает электрод, бывший положительным, полярность электродов успевает измениться. И снова перед ступком электронов впереди находится положительный электрод, снова повторяется ускорение. На рисунке показаны два момента работы линейного ускорителя: в один полупериод (*A*) — положительное напряжение на всех четных электродах; в другой полупериод (*B*) — полярность электродов обратная.

В линейном ускорителе заряженные частицы лишь один раз проходят от начала ускорителя к его концу. Если, например, длина ускорителя 2 м и требуется ускорить частицы до 10 млн. *e*, то на каждом метре частицы должны набирать 5 млн. *e*.

С линейными ускорителями состязаются циклические ускорители, в которых заряженные частицы движутся по криволинейным путям и по много раз проходят мимо одних и тех же ускоряющих электродов.

2—Циклотрон—один из первых удачных циклических ускорителей. Путь частиц искривляется сильным постоянным магнитным полем, а ускорение получается за счет высокочастотного электрического поля, которое действует между двумя *D*-образными электродами. Заряженные частицы движутся по спирали от одного электрода к другому и за каждый оборот дважды наращивают свою скорость. При скоростях выше 10 млн. *e* масса ускоряемых атомных ядер начинает заметно расти. Ядра начинают двигаться не впопад,— как говорят, выпадают из синхронизма.

3—Синхроциклотрон, в котором частота тока меняется в соответствии (синхронно) с изменением массы заряженных частиц. В простом циклотроне одновременно ускоряется много порций заряженных частиц. В синхроциклотроне одновременно ускоряется только одна порция, для которой выполняется условие синхронизма. Ток синхроциклотрона во много раз меньше, чем циклотрона. Но синхроциклотрон может ускорить ядра водорода или гелия до сотен миллионов вольт.

Для еще более высоких энергий применяются циклические резонансные ускорители, в которых частицы движутся не по спирали, а по кругу. Это позволяет удешевить и упростить магнит.

4—Схема ускорителя, который позволяет разогнать частицы до миллиардов вольт. Это искусственные космические лучи. Поэтому подобные ускорители называются иногда космотронами. В СССР их называют синхрофазотронами.

Ускорительная камера имеет форму кольцевой трубы — баранки. В нее впускаются заряженные частицы, предварительно ускоренные до нескольких миллионов вольт. В процессе дальнейшего ускорения магнитное поле, пронизывающее баранку, все нарастает. Оно удерживает порцию заряженных частиц на их кольцевом пути, как праща удерживает раскручиваемый камень. В одном или нескольких местах баранки размещены ускоряющие электроды. В процессе ускорения частота напряжения на электродах нарастает, чтобы поддерживать синхронизм движения.

Процесс ускорения в синхрофазотроне может продолжаться несколько секунд. За это время заряженные частицы делают много миллионов оборотов по кольцевой трубе, проходят суммарный путь в сотни тысяч километров.

Электромагнит этого ускорителя весит 36 тыс. т. Диаметр его достигает почти 60 м. Ядра водорода — протоны, которые должны быть ускорены, вырабатываются в специальной «протонной пушке». Затем на них воздействует постоянное электрическое поле напряжением немногим менее миллиона вольт. Далее протоны поступают во вспомогательный линейный ускоритель, где продолжают набирать скорость. На выходе из линейного ускорителя они обладают энергией до 9 млн. в. После этого протоны поступают в кольцевую камеру, окружность которой превышает 200 м. В этой камере протоны, все более набирая скорость, должны совершить 4,5 млн. оборотов, пробежав за 3,3 секунды путь, превышающий в два с половиной раза расстояние от Земли до Луны.

Центробежные силы, стремящиеся сорвать протоны с их кольцевой траектории, по мере ускорения все возрастают. Но в такой же мере нарастает и силовое поле гигантского электромагнита, между полюсами которого уложена кольцевая ускорительная камера. К концу периода ускорения при последних оборотах протонного облачка мощность, питающая обмотки электромагнита, достигает пика в 140 тыс. киловольт-ампер.

Схема электропитания магнита устроена так, что после окончания цикла ускорения запасенная в магнитном поле энергия перебрасывается обратно к генераторам, а затем, в следующий цикл ускорения, поступает вновь в электромагнит.

В начале цикла ускорения высокочастотный генератор, подающий напряжение на ускоряющие электроды, работает на частоте несколько сот килогерц. По мере ускорения протонов частота генератора все повышается и в конце цикла ускорения доходит до десятков мегагерц. Опубликованы проекты еще более мощных ускорителей на энергии в десятки миллиардов электроновольт.

ЭЛЕКТРОННОЕ ОБЛУЧЕНИЕ ПРОДУКТОВ

Есть старинная легенда о заговоренной пуле, от которой не уйти ни волку, ни оборотню, никакому врагу. Но в прошлом веке были открыты враги, против которых бессильны пули. Это микробы и вирусы. Громадных усилий и средств стоит человечеству борьба с этими самыми страшными из его врагов.

Успехи современной физики дали новое оружие для борьбы с невидимыми врагами: потоки мельчайших заряженных частиц — электронов.

При скоростях в несколько тысяч вольт (такова скорость электронов в приемных телевизионных трубках) электроны, встречая на своем пути даже очень тонкую преграду, полностью затормаживаются. Они не способны, например, пробить стеклянную стенку телевизионной трубки и выйти наружу.

Пробивная сила электронного потока с увеличением его

скорости быстро растет. Электроны, ускоренные до миллиона вольт, способны пробить 5-миллиметровый слой вещества с плотностью, равной плотности воды. А электронный поток, ускоренный до 10 млн. в, может пройти сквозь ампулу с лекарствами, сквозь консервную банку из любого материала.

При этом в сложных химических соединениях, находящихся внутри банки или ампулы, под действием электронных потоков происходят различные превращения, а вирусы и бактерии убиваются электронным потоком.

Вообразите, что в помещение, где находится множество кроликов, попал тигр. Чтобы уберечься от хищника, можно нагреть помещение до высокой температуры. Тигр погибнет, но одновременно зажарятся и все кролики. Если же обстрелять помещение снаружи из пулемета, то, дав определенную плотность пуль на каждый квадратный метр поверхности, можно быть совершенно уверенным, что тигр будет убит. При этом, понятно, погибнет и некоторое количество кроликов, но многие из них все же останутся в живых. Похожим образом действует электронный поток на пищевые продукты, лекарства и другие стерилизуемые объекты.

Самые мелкие микробы крупнее самых сложных молекул (жиров, белков, витаминов), и поэтому микробы в первую очередь поражаются электронами. В этом принципиальное различие между новым методом электронной стерилизации и старыми методами стерилизации при помощи нагрева.

Чтобы обеспечить стопроцентное уничтожение вирусов и микробов, включая самые устойчивые формы, достаточно, чтобы в каждый грамм продукта вводилась электронным потоком энергия, равная нескольким ваттсекундам. Такое количество энергии способно нагреть продукт только на один-полтора градуса. А во многих случаях вполне достаточна значительно меньшая доза электронного облучения.

Таким образом, количество энергии, которое вводится в продукт при стерилизации его электронным лучом, значительно меньше, нежели при обычной термической (тепловой) стерилизации. При прохождении электронного луча значительно меньше изменяется качество продукта, чем при его кипячении. При помощи электронных лучей могут быть созданы совершенно новые, небывалые виды консервов. Так можно предохранить от порчи свежее сырое мясо, свежие плоды и ягоды. В качестве оболочек для консервов, помимо стекла и металла, возможно применение ряда новых, более дешевых и удобных в обращении материалов (например, лакированной бумаги, пластмассовых пленок).

Потоки быстрых электронов могут быть созданы при помощи ускорителей заряженных частиц различных типов.

При постройке ускорителей для ядерных исследований физики заботятся о к.п.д. этих машин в последнюю очередь. Для

ядерных реакций необходимо иметь потоки заряженных частиц возможно более высоких энергий, но сила потока (количество частиц в нем) может быть мала. Физики удовлетворяются ускорителями с малой мощностью потока и низким (часто много меньшим одного процента) к.п.д.

Для электронной обработки продуктов необходимы ускорители на относительно скромные напряжения — не выше десятка миллионов вольт, но дающие большую выходную мощность потока и высокий к.п.д. Один из перспективных типов подобных ускорителей — это высокочастотные многокаскадные преобразовательные установки.

При помощи электронного потока мощностью всего лишь в один киловатт можно стерилизовать несколько тонн продуктов в смену.

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ СХЕМЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКИХ И СВЕРХВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Динамомшины постоянного тока могут быть построены на напряжение не выше нескольких киловольт. Электростатические генераторы постоянного тока (с переносом электрических зарядов лентами из изоляционного материала) дают напряжения до нескольких мегавольт, но имеют низкий к.п.д. (меньше 30%) и дают токи не больше одного миллиампера.

Наиболее распространенный в настоящее время способ получения постоянного тока высокого напряжения — это выпрямление переменных токов.

Множество выпрямительных установок работает на токе промышленной низкой частоты 50 гц. Но в ряде случаев выгодно питать высоковольтные выпрямительные устройства высокочастотным током. При этом уменьшается расход материалов (проводниковых и изоляционных), отпадает необходимость в громоздких тяжелых стальных сердечниках. Даже при больших изоляционных расстояниях, необходимых в установках сверхвысоких напряжений, электроэнергия может передаваться с малыми потерями. Высокий к.п.д. высокочастотного выпрямительного устройства может быть получен и при малых мощностях в доли ватта и при больших мощностях в тысячи киловатт.

Потери энергии в электрическом контуре пропорциональны квадрату напряжения. Часто выгоднее вместо одного высоковольтного контура применить каскад относительно низковольтных контуров. Вместе с тем и напряжение, на котором могут работать электрические вентили, также ограничено. Поэтому представляют интерес многокаскадные преобразовательные схемы (рис. 18).

Преобразовательные схемы с полупроводниковыми вентилями могут работать в качестве «трансформаторов постоянного тока» — повышать в несколько тысяч или десятков тысяч раз напряжение от низковольтной аккумуляторной батареи.

Возможно применение высокочастотных преобразовательных схем в различных электромедицинских установках, в электрофильтрах, в системах зажигания бензиновых двигателей вместо применяемых в настоящее время индукционных катушек, имеющих низкий к.п.д. и работающих с неустойчивыми и ненадежными механическими прерывателями. Широко применяются высокочастотные выпрямительные схемы для питания высоким напряжением электроннолучевых трубок в телевизионных приемниках.

Высокочастотные схемы могут быть также использованы для мощных (тысячи киловатт) испытательных установок на напряжение постоянного тока в несколько мегавольт. Для исследований в области ядерной физики возможно создание таких установок, в которых сверхвысокое постоянное напряжение имеет ничтожную пульсацию и поддерживается постоянным с высокой степенью точности как при непрерывной (длительной), так и при импульсной работе.

В последние годы идут усиленные поиски наиболее эффективных методов ведения термоядерных реакций для мирного использования атомной энергии. Одним из путей решения проблемы «сжигания водорода в гелий» может быть бомбардировка мишени из «термоядерного горючего» мощным, сильно сфокусированным и группированным потоком водородных ядер, ускоренных при помощи высокочастотных установок.

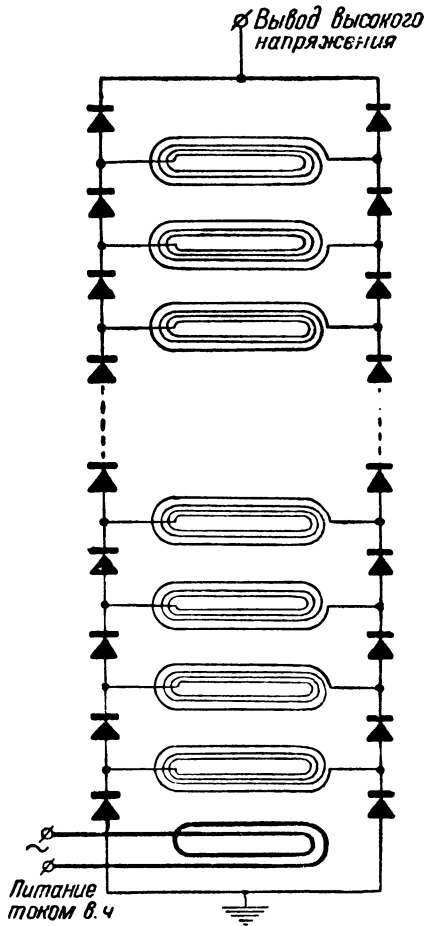


Рис. 18. Многокаскадная выпрямительная схема с высокочастотным энергопитанием.



ЛИТЕРАТУРА

Бабат Г. И. Питание энергией безрельсового наземного транспорта посредством электромагнитной индукции. «Известия ОТН АН СССР», № 2, 1946 г.

Бабат Г. И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение. Энергоиздат. 1946 г.

Бабат Г. И. Рассказы о токах высокой частоты. Энергоиздат. 1948 г.

Гринберг А. П. Методы ускорения заряженных частиц. Гостехтеоретиздат. 1950 г.

Жежерин Р. П. Машинные генераторы для высокочастотного нагрева. Машгиз. 1954 г.

Конашинский Д. А. и Турлыгин С. Я. Введение в технику ультравысоких частот. Энергоиздат. 1951 г.

Мазнин А. Н., Нетушил А. В., Парини Е. Н. Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников. Энергоиздат. 1950 г.

Применение токов высокой частоты в станкоинструментальной промышленности. Труды конференции 1950 г., под редакцией Бабат Г. И. Изд. ЦБТИ Министерства станкостроения СССР. 1951 г.

Промышленное применение токов высокой частоты. Доклады первой ленинградской конференции 1951 г. под редакцией Вологодина В. П., Головина Г. Ф., Донского А. В. ВНИТОМАШ, кн. 50. Машгиз. 1952 г.

Промышленное применение токов высокой частоты. Доклады второй ленинградской конференции, под редакцией Головина Г. Ф. и Донского А. В. ВНИТОМАШ, кн. 33. Машгиз. 1954 г.

М. Стенли Ливингстон. Ускорители (установки для получения заряженных частиц больших энергий). Изд-во иностранной литературы. 1956 г.

Турлыгин С. Я. Введение в общую радиотехнику. Энергоиздат. 1952 г.

СОДЕРЖАНИЕ

	<i>Стр.</i>
Введение	3
Основные свойства токов высокой частоты	4
Генераторы токов высокой частоты	9
Развитие методов генерирования ТВЧ	9
Машинные генераторы	10
Генераторы на электронных лампах с управляющими сетками	14
Генераторы на ионных управляемых вентиллях	18
Электронные генераторы сверхвысоких частот	19
Применение в генераторах ТВЧ полупроводниковых приборов	22
Высокочастотный нагрев	24
Нагрев металлов	25
Нагрев полупроводников и диэлектриков	29
Электромагнитный луч-резец	32
Некоторые дальнейшие тенденции и возможности технологических применений ТВЧ	33
Высокочастотный транспорт	34
Атака атомного ядра	38
Электронное облучение продуктов	42
Высокочастотные схемы для получения высоких и сверхвысоких напряжений постоянного тока	44
Литература	46

★ К ЧИТАТЕЛЯМ ★

Издательство «Знание» Всесоюзного общества по распространению политических и научных знаний просит присылать отзывы об этой брошюре по адресу: Москва, Новая площадь, д. 3/4.

Автор
Георгий Ильич Бабат.

Редактор Т. Ф. Исланкина.
Техн. редактор Л. Е. Атрощенко.
Корректор Л. С. Малышева.

А 10475. Подп. к печ. 10/X 1956 г. Тираж 64 500 экз. Изд. 187.
Бумага 60×92¹/₁₆—1,5 бум. л.= 3 п. л. Учетно-изд. 2,92 л. Заказ № 1998.

Ордена Ленина типография газеты «Правда» имени И. В. Сталина.
Москва, ул. «Правды», 24.

60 коп.

ВСЕСОЮЗНОЕ ОБЩЕСТВО
ПО РАСПРОСТРАНЕНИЮ ПОЛИТИЧЕСКИХ И НАУЧНЫХ ЗНАНИЙ
ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»

Принимается подписка
на БРОШЮРЫ-ЛЕКЦИИ на 1957 год

ПЕРВАЯ СЕРИЯ — общественно-политическая — 40 брошюр-лекций по вопросам истории КПСС, истории СССР, всеобщей истории.

ВТОРАЯ СЕРИЯ — общественно-политическая — 40 брошюр-лекций по вопросам диалектического и исторического материализма, истории философии, государства и права, педагогики и научно-атеистических знаний.

ТРЕТЬЯ СЕРИЯ — в помощь экономическому образованию — 40 брошюр-лекций по вопросам политической экономии, конкретной экономики промышленности, сельского хозяйства.

ЧЕТВЕРТАЯ СЕРИЯ — научно-техническая — 40 брошюр-лекций по вопросам техники, организации производства, истории технических открытий, изобретений, о передовом производственном опыте, о наиболее выдающихся работах в области научно-технического прогресса в СССР и за рубежом.

ПЯТАЯ СЕРИЯ — сельскохозяйственная — 28 брошюр-лекций о достижениях сельскохозяйственной науки, по вопросам организации сельскохозяйственного производства, об опыте новаторов и передовиков сельского хозяйства.

ШЕСТАЯ СЕРИЯ — литература и искусство — 24 брошюры-лекции по советской и русской классической литературе, литературе народов СССР и зарубежной литературе, по искусству и отдельным вопросам литературоведения, языкознания и эстетики.

СЕДЬМАЯ СЕРИЯ — вопросы международной жизни — 24 брошюры-лекции о внешней политике СССР, стран народной демократии, о внешней политике и внутреннем положении капиталистических государств, о современных международных отношениях, борьбе за мир и безопасность, о рабочем, демократическом и национально-освободительном движении.

ВОСЬМАЯ СЕРИЯ — естественно-научная — 52 брошюры лекции по вопросам биологии, медицины, геологии, географии, химии, физики, математики и астрономии.

УСЛОВИЯ ПОДПИСКИ:

С Е Р И Я	Колич. лекций	Подписная цена		
		на год	на полгода	на квартал
Первая	40	24 р.	12 р.	6 р.
Вторая	40	24 р.	12 р.	6 р.
Третья	40	24 р.	12 р.	6 р.
Четвертая	40	24 р.	12 р.	6 р.
Пятая	28	14 р.	7 р.	3 р. 50 к.
Шестая	24	12 р.	6 р.	3 р.
Седьмая	24	12 р.	6 р.	3 р.
Восьмая	52	31 р. 20 к.	15 р. 60 к.	7 р. 80 к.
Всего:	288	165 р. 20 к.	82 р. 60 к.	41 р. 30 к.

ПОДПИСКА ПРИНИМАЕТСЯ городскими и районными отделами «Союзпечать», конторами, отделениями и агентствами связи, почтальонами, а также общественными уполномоченными по подписке на фабриках, заводах, в совхозах и колхозах, в учебных заведениях и учреждениях.

Издательство «ЗНАНИЕ»