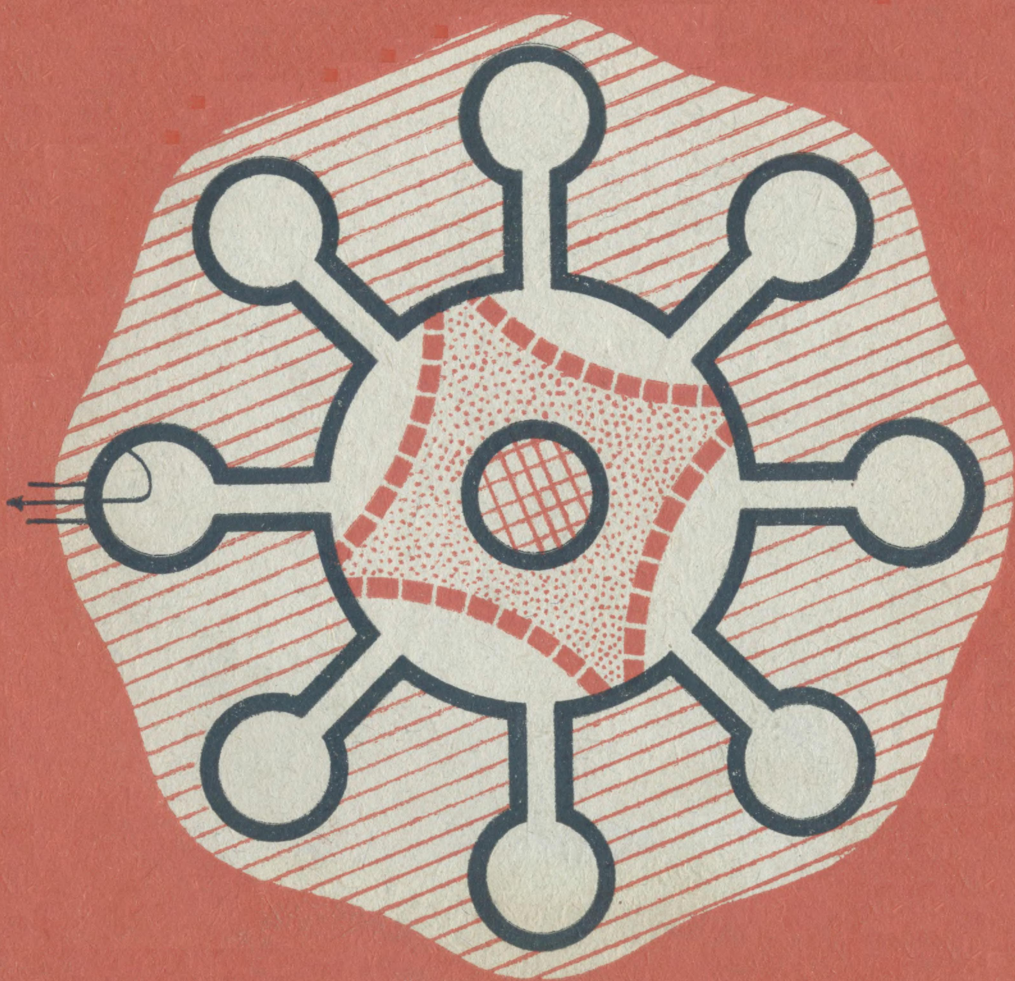




РАДИОЭЛЕКТРОНИКА
И СВЯЗЬ



1967
3

XIV С Е Р И Я

Ю. Н. ХЛОПОВ

МАГНЕТРОН

**Ю. Н. ХЛОПОВ,
доктор техни-
ческих наук**

**Издательство
«З Н А Н И Е»
Москва 1967**

М А Г Н Е Т Р О Н



Scan AAW

В книжке популярно излагаются результаты исследований, проведенных автором и доложенных им на Научных сессиях, посвященных Дню Радио в Москве несколько лет назад. Иллюстрации и примеры расчета выполнил М. Хлопов. Учитывая, что принятый здесь способ описания механизма колебаний и расчета несколько отличается от того, что можно найти в других изданиях, посвященных магнетрону, отклики и критические замечания будут восприняты автором с особым интересом и благодарностью.

Ю. ХЛОПОВ

Содержание

Введение	3
Из истории магнетрона	4
Принцип действия магнетрона	5
Параметры магнетронов	8
Рабочая характеристика	19
Малое, но важное	20
Зоны режимов	22
Цилиндрический магнетрон	25
Другие виды колебаний	26
Типы магнетронов	28
Рассчитаем магнетрон	34
Предел мощности магнетрона	41
Использование магнетрона	45
Заключение	47
Литература	48

Хлопов Юрий Николаевич

МАГНЕТРОН

Редактор Б. В. Фомин
Худож. редактор Е. Е. Соколов
Техн. редактор Л. А. Дороднова
Корректор Е. Э. Ковалевская
Обложка А. Г. Ординарцева

3-4-4
176-67

А 01864. Сдано в набор 21.XI 1966 г. Подписано к печати 23.I 1967 г. Формат бум. 60×90¹/₁₆. Бумага типографская № 3. Бум. л. 1,5. Печ. л. 3,0. Уч.-изд. л. 2,71. Тираж 37 400 экз. Издательство «Знание», Москва, Центр. Новая пл., д. 3/4. Зак. 3725. Типография изд-ва «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.
Цена 9 коп.

введение

Наука и техника в современных условиях развиваются с необыкновенной быстротой, захватывают все стороны человеческой деятельности и требуют от нас непрерывного пополнения своих знаний во многих областях, в том числе в физике. В связи с этим растет потребность в пособиях, популярно излагающих основные физические явления, без чрезмерного их упрощения. Одно из важных явлений, связанное с перемещением заряженных частиц в скрещенных электрическом и магнитном полях, используется в приборе, названном магнетроном. Именно этому явлению посвящена книжка, в доступной форме описывающая физическую сущность и возможные применения данного явления.

Магнетрон — это прибор, преобразующий энергию постоянного электрического тока в энергию сверхвысокочастотных (СВЧ) электромагнитных колебаний. Любое преобразование энергии обязательно связано с потерями. В магнетроне такие потери наименьшие. Поэтому говорят, что магнетрон обладает наиболее высоким коэффициентом полезного действия. Магнетрон универсален. Он генерирует и усиливает колебания и используется в радиолокации, связи, энергетике и химии; магнетроны можно найти в лабораториях и шахтах, они появились в космосе и под водой.

Когда речь заходит о генераторах колебаний, то прежде всего интересуются величиной отдаваемой мощности и длиной волны (частотой) генерируемых или усиливаемых колебаний. Магнетроны имеют мощность от очень малой, измеряемой милливаттами (*мвт*), до очень большой, равной мегаваттам (*Мвт*), величины. Они используются в радиоустройствах импульсного и непрерывного действия в миллиметровом, сантиметровом и дециметровом диапазонах волн [1÷9].

из истории магнетрона

Впервые об особенностях движения заряженных частиц в скрещенных электрическом и магнитном полях люди задумались после того, как в 1831 г. М. Фарадей и в 1832 г. Д. Генри независимо друг от друга открыли закон электромагнитной индукции, заключающийся в возникновении электрического тока в замкнутом проводнике при изменении магнитного поля, пронизывающего контур проводника. Однако потребовалось 90 лет прежде, чем в 1921 г. А. Хэлл выяснил, что в вакуумном диоде действие магнитного поля может привести к прекращению тока между катодом и анодом. Электроны при этом отклоняются от направления, заданного электрическим полем, настолько, что оказываются не в состоянии достичь поверхности анода.

Далее события развивались в нарастающем темпе. Многочисленные исследователи, среди которых одно из первых мест занимали советские ученые А. А. Слуцкий, А. Я. Усиков, М. Т. Грехова и др., начали изучать свойства диода, помещенного в магнитное поле, его способность генерировать колебания дециметровых и сантиметровых волн [1, 3] и, конструируя различные модификации этого прибора, пришли к выводу, что наиболее эффективно генерация колебаний происходит в лампе, в которой анод представляет собой набор металлических пластин, разделенных щелями (в магнетроне с разрезным анодом). В 1935 г. на одной из разновидностей магнетрона с разрезным анодом С. А. Зусмановский достиг рекордных по тому времени результатов, получив в дециметровом диапазоне волн мощность свыше 15 кВт (в режиме непрерывного генерирования) [3].

Выдающимся событием в развитии магнетрона явилось создание в 1936—1937 гг. Н. Ф. Алексеевым и Д. Е. Маляровым многорезонаторного магнетрона [3], приведшее в годы второй мировой войны к технической революции в области радиолокации. По экономичности, габаритам и малым значениям анодного напряжения многорезонаторный магнетрон до сего времени остается непревзойденным среди источников мощных СВЧ-колебаний.

В послевоенный период, особенно начиная с 1950—1955 гг., к многорезонаторному магнетрону добавился добрый десяток новых видов магнетронов, работающих как в режиме автогенерации, так и усиления импульсных и непрерывных колебаний [5, 6, 7]. В их числе: лампа обратной волны типа «М» (ЛОБ типа «М»), обладающая способностью быстрой перестройки электрическим способом частоты генерируемых колебаний в широкой области частот; амплитрон, обеспечиваю-

щий усиление колебаний; ниготрон и коаксиальный магнетрон, обладающие повышенной стабильностью частоты. Интенсивно развивалась в послевоенный период также теория магнетрона. Важное значение для практического развития магнетрона имели исследования и обобщения, сделанные Г. Коллинзом, С. И. Бычковым, В. Ф. Коваленко и многими другими отечественными и зарубежными учеными [1, 3, 4]. Особое место занимает фундаментальный труд академика П. Л. Капицы [2] «Электроника больших мощностей», в котором вскрыты главные физические законы, лежащие в основе действия магнетрона.

Наука и техника магнетрона находятся сейчас в зените своего развития. Не ограничиваясь случаем вакуума, пытливым ум исследователей стремится познать законы движения заряженных частиц в скрещенных электрическом и магнитном полях в газе и в твердом теле, в том числе находящемся в состоянии сверхпроводимости.

Впереди — новые открытия и находки.

принцип действия магнетрона

Действие магнетрона основано на том, что магнитное поле, радикально изменяя траектории движения заряженных частиц, находящихся в электрическом поле, создает благоприятные условия для преобразования энергии постоянного тока в энергию колебаний. На примере одной, пусть отрицательно заряженной, частицы рассмотрим некоторые характерные особенности ее движения в скрещенных электрическом и магнитном полях.

На рис. 1 представлено несколько случаев движения заряженной частицы под действием сил полей. Заряженная частица e выходит из испускателя I . Если магнитное поле отсутствует, как это показано на рис. 1, a , то траектория движения частицы совпадает с силовой линией постоянного электрического поля, образованного двумя плоскими пластинами (анодом A и катодом K), между которыми действует разность потенциалов, причем анод положителен относительно катода. Траектория движения частицы изображена на рисунке прямой. Испускатель, как обычно, расположили на катоде.

Случай, представленный на рис. 1, b , отличается от предыдущего тем, что на частицу, помимо электрического, действует также магнитное поле B , направленное от читателя за чертеж. Траектория движения частицы при соответствующем

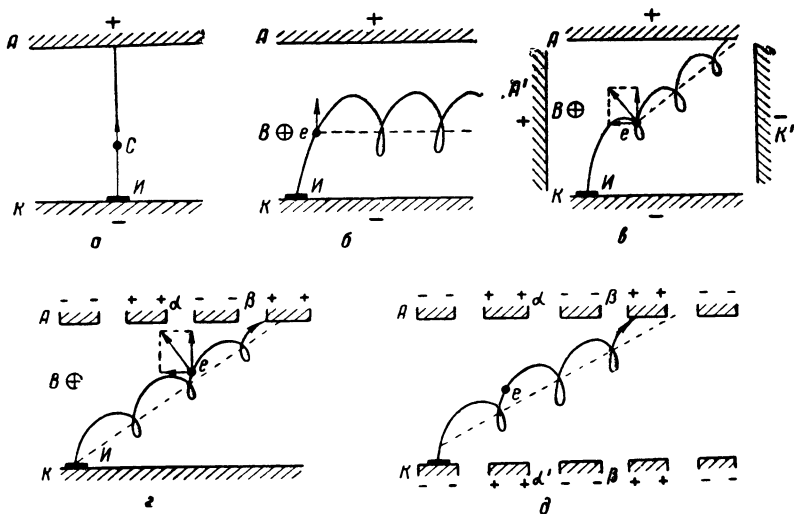


Рис. 1. Графическое пояснение принципа действия магнетрона

подборе величин электрического и магнитного полей приобретает сложный циклоидальный характер: частица вращается вокруг некоторого центра, который в свою очередь смещается в направлении, параллельном плоскостям анода и катода. Вращательное и переносное движение совершаются одновременно. Траектория движения частицы e нанесена на рисунке сплошной линией, а траектория движения центра круга вращения частицы — пунктиром.

Третий случай, изображенный на рис. 1, в, отличается от предыдущего наличием дополнительного анода A' и дополнительного катода K' , между которыми также действует постоянное напряжение с плюсом на аноде и минусом на катоде. Сложение основного и дополнительного электрических полей вызывает образование результирующего поля, направление которого не совпадает с направлением основного поля. Поскольку переносное движение частицы должно совершаться строго перпендикулярно к направлению электрического поля, в данном случае траектория переносного движения уже не будет параллельна плоскостям анода и катода, а окажется наклонной. Это очень важное обстоятельство, так как благодаря дополнительному электрическому полю частица получает возможность достичь основного анода, чего она никак не могла бы сделать в случае, представленном на рис. 1, б. Протекание электрического тока между анодом и катодом — одно из условий поддержания колебаний в магнетроне.

Рассмотрим случай, представленный на рис. 1, г. Он отличается от предыдущего способом наложения дополнительного

электрического поля на основное. Здесь отпадает необходимость в дополнительных электродах. Их роль выполняет сам основной анод, представляющий собой набор отдельных металлических пластин — сегментов, разделенных щелями, в которых создается дополнительное электрическое поле. И еще одно отличие. В предыдущем случае дополнительное поле действует непрерывно на всем протяжении траектории движения заряженной частицы. В случае, представленном на рис. 1, г, в этом нет необходимости. Достаточно, чтобы требуемое по величине и направлению поле создавалось лишь той щелью между сегментами, мимо которой в данный момент пролетает частица, а в остальных щелях поле, вообще говоря, может быть любым по направлению. Однако необходимо при этом согласовать моменты появления напряжения на щелях с переносным движением частиц. Например, щель α , мимо которой в данный момент пролетает частица (см. рис. 1, г), создает поле нужного направления, а щель β — поле противоположного направления. Но после того, как частица окажется против щели β , эта щель в свою очередь создаст поле нужного направления, а щель α будет создавать поле противоположного направления. Таким образом, на каждой из щелей действует переменное напряжение, т. е. образуются колебания.

Последний, пятый, случай, представленный на рис. 1, д, отличается от четвертого тем, что не только анод, но и катод образуется системой металлических сегментов с щелями между ними. Принципиального различия между обоими случаями нет. Магнитное поле имеет прежнее направление. Требуется только, чтобы напряжение на щелях α и α^1 и, соответственно, на щелях β и β^1 изменяло свой знак одновременно или, как говорят в радиотехнике, синхронно и синфазно.

На величину радиуса круга вращения частицы, движущейся в скрещенных электрическом и магнитном полях, в реальных системах накладываются определенные ограничения. Вернемся снова к рисунку 1, б. Если радиус будет таким, что на первом же витке частица достигнет поверхности анода, то ни о каких колебаниях магнетронного вида не может быть и речи. Если циклоидальная кривая лишь касается поверхности анода, то говорят, что магнетрон находится в состоянии отсечки. Колебания возможны лишь при условии, что радиус круга вращения имеет величину, меньшую той, которая соответствует случаю отсечки. Величина радиуса зависит от напряжения, действующего между анодом и катодом магнетрона (чем выше напряжение, тем радиус больше) и от магнитного поля (чем магнитное поле сильнее, тем радиус меньше). В состоянии отсечки говорят, что анодное напряжение и магнитное поле имеют критические значения.

Итак, действие магнетрона основано на движении заряженных частиц в скрещенных электрическом и магнитном полях при наличии дополнительного электрического поля, воздействие которого на частицы некоторым образом согласовано с движением этих частиц. Колебания в магнетроне возможны при условии, что основное электрическое поле не превышает, а магнитное поле превышает критические значения, определяемые размерами пространства, в котором возможно свободное движение частиц.

параметры магнетронов

Это нам пригодится. Для поддержания колебаний в магнетроне, как и во всяком другом генераторе, требуется устройство, задающее частоту и другие параметры колебаний. В магнетроне таким устройством может быть колебательный контур, система колебательных контуров (резонаторов), замедляющая или любая другая (колебательная) система. В соответствии с предыдущим такая колебательная система должна быть связана с сегментами анода (или анода и катода) или с теми источниками, которые задают дополнительное электрическое поле. Рассмотрим колебательные системы СВЧ.

Свойства этих систем описываются большим количеством характеристик и параметров, но мы остановимся только на тех, без которых невозможно описать свойства магнетрона.

Назначение любой колебательной системы состоит в том, чтобы из бесконечно большого числа возможных колебаний выделять лишь те, частота (или область частот) которых лежит в заданных пределах. Колебательные системы магнетронов могут быть выполнены с фиксированной настройкой на некоторую определенную частоту, с перестройкой частоты в определенном диапазоне, а также могут быть предназначены для работы в полосе частот. В последнем случае их называют замедляющими системами.

Одним из важных параметров колебательной системы магнетрона является ее сопротивление Z , которое на практике часто определяется как произведение волнового сопротивления колебательной системы ρ и нагруженной добротности этой системы Q_n . Какой бы сложной ни была колебательная систе-

$$Z = \rho Q_n. \quad (1)$$

ма, ее всегда можно с некоторой погрешностью, допустимой с практической точки зрения, заменить простейшим контуром, имеющим те же значения параметров в интересующих усло-

виях. Если подобный эквивалентный контур имеет индуктивность L и емкость C , то его волновое сопротивление

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (2)$$

Величина Q_H показывает, во сколько раз повышается напряжение на элементах эквивалентного (последовательного) контура за счет резонанса по сравнению с действующей в нем ЭДС, при условии, что магнетрон соединен с внешней по отношению к нему нагрузкой. Помимо ее нагруженного значения Q_H , добротность колебательной системы магнетрона имеет еще два значения: Q_0 и $Q_{вн}$. Первое из них учитывает потери энергии только в самой колебательной системе магнетрона, второе — потери энергии только во внешней по отношению к магнетрону нагрузке. Перечисленные добротности связаны между собой соотношением

$$\frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_{вн}} = \frac{1}{Q_H}$$

Другим параметром колебательной системы магнетрона, который потребуется нам в дальнейшем, является коэффициент полезного действия ее η_k , определяемый из соотношения

$$\eta_k = \frac{Q_H}{Q_{вн}}. \quad (3)$$

Поскольку до сих пор отсутствуют универсальные методы расчета Z , ρ и Q колебательных систем СВЧ, расчет магнетронов в большинстве случаев оказывается сложным и неточным. В конечном итоге параметры колебательной системы магнетрона уточняются путем измерений на опытных моделях создаваемого прибора.

И еще один параметр СВЧ колебательных систем, используемых в магнетронах, потребуется нам в дальнейшем, это — коэффициент замедления k_3 , определяющий, во сколько раз медленнее распространяются колебания вдоль колебательной системы по сравнению со случаем распространения их в свободном пространстве (вакууме). Он выражается так:

$$k_3 = \frac{c}{V}, \quad (4)$$

где c — скорость света в свободном пространстве, а V — скорость распространения колебаний вдоль колебательной системы.

Колебательная система магнетрона конструктивно представляет собой единое целое с сегментами анода (и катода). Исключений из этого правила немного. Поэтому граница колебательной системы, как правило, проходит по поверхности сегментов анода (или также катода) магнетрона. Такая тес-

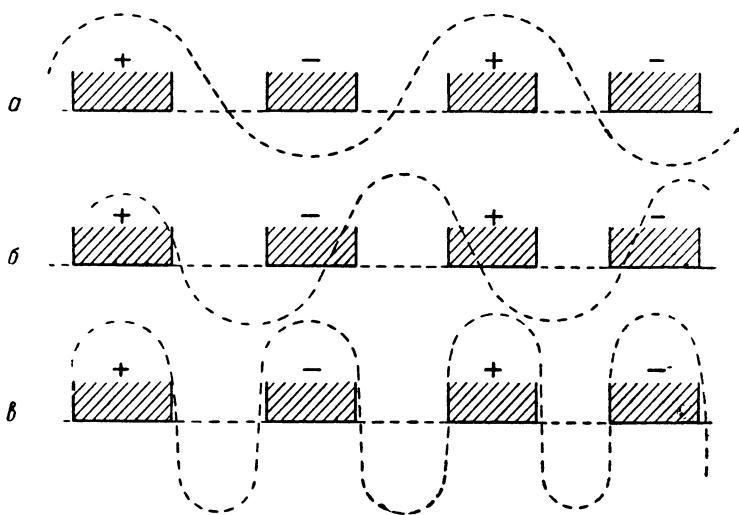


Рис. 2. Некоторые виды колебаний

ная связь этих элементов магнетрона накладывает определенные ограничения на устройство и характеристики прибора. В этих условиях особую важность приобретает распределение переменного напряжения, образующегося на колебательной системе, по сегментам анода.

На рис. 2 приведены три случая распределения переменного напряжения по поверхности анода магнетрона. На рис. 2, а представлен наиболее распространенный в многорезонаторных магнетронах противофазный («л»-вид) колебаний, характеризующийся тем, что любые смежные сегменты в любой момент времени имеют равные по величине, но противоположные по знаку потенциалы.

На рис. 2, б представлен не «л»-вид колебаний, а на рис. 2, в — вид колебаний «л/2», используемый в ниготроне.

Пространство взаимодействия. Свободное пространство в магнетроне, ограниченное поверхностями анода и катода, в котором движутся заряженные частицы (будем для определенности и большей практической направленности считать, что это электроны), называется пространством взаимодействия.

В пространстве взаимодействия действуют скрещенные постоянные электрическое и магнитное поля, а также переменное электрическое поле, создающееся за счет переменного напряжения, действующего на сегментах анода (катода). Переменное электрическое поле в пространстве взаимодействия магнетрона распределяется неравномерно. Наибольшую интенсивность оно имеет в непосредственной близости к сегмен-

там анода, затем резко спадает и у поверхности катода практически отсутствует. Такое распределение переменного электрического поля навело на мысль: в целях упрощения описания действия магнетрона разбить пространство взаимодействия магнетрона на две области — область сортировки электронов, непосредственно прилегающую к катоду, и область обмена энергией, охватывающую остальную часть пространства взаимодействия, вплоть до анода.

Электроны, равномерно испускаемые катодом, прежде всего оказываются в области сортировки, где действует слабое переменное электрическое поле. В зависимости от того, в какой момент и с какой точки поверхности катода вылетел электрон, он может оказаться по отношению к воздействующему на него переменному электрическому полю в фазе, благоприятной или неблагоприятной для последующего участия его в колебательном процессе. Те электроны, которые оказываются в неблагоприятной фазе, совершают одну петлю циклоиды и возвращаются на катод. Те же электроны, которые оказываются в благоприятной фазе, пересекают поверхность перехода (конечно, условную, в действительности такой поверхности мы наблюдать не можем) и оказываются в области обмена энергией. Возвращение на катод для них исключено.

Благоприятность и неблагоприятность фазы зависит от того, какое воздействие оказывает переменное электрическое поле на движущийся электрон. Если поле ускоряет электрон, заставляя его быстрее двигаться вдоль пространства взаимодействия, — фаза неблагоприятна; на электрон начинает действовать сила, толкающая его назад, к поверхности катода. Если поле тормозит электрон, — фаза благоприятна, электрон начинает передавать часть своей энергии воздействующему на него переменному электрическому полю, а сам постепенно смещается в направлении к аноду.

В области обмена энергией электроны, находящиеся в благоприятной фазе по отношению к переменному электрическому полю, сохраняют циклоидальность своего движения. Однако из-за резкого нарастания амплитуды переменного электрического поля их траектории приобретают сложный петлеобразный характер.

В продольном направлении вполне естественно пространство взаимодействия поделить на ячейки по числу сегментов и щелей между ними. Условимся, что границы между ячейками пространства взаимодействия проходят через оси симметрии каждого из сегментов. Таким образом, каждая ячейка захватывает щель и по половине смежных сегментов. При работе магнетрона на виде колебаний, отличном от противофазного, помимо указанной геометрической будем выделять еще электрическую протяженность ячейки пространства взаимодействия.

Взаимодействие электронов с полем. Взаимодействие электронов с переменным электрическим полем — процесс сложный и в своем роде исключительный. Действительно, в магнетроне не только происходит передача энергии от электронов, находящихся в благоприятной фазе, этому переменному полю, а создаются и непрерывно поддерживаются условия, наиболее благоприятные для передачи энергии. В процессе их движения через пространство взаимодействия электроны распределяются в строгом порядке в виде язычков (сгустков), причем сгустки располагаются таким образом, что они оказывают наиболее сильное влияние на переменное электрическое поле колебательной системы.

Пусть в какое-то мгновение язычки, движущиеся вдоль пространства взаимодействия со скоростью V , находятся под серединами щелей. Поскольку в язычки попадают лишь те электроны, которые находятся в благоприятной фазе по отношению к переменному электрическому полю, электроны в язычках движутся к сегментам, имеющим отрицательный потенциал, и удаляются от сегментов с положительным потенциалом (точь-в-точь как в случае отдельного электрона, рассмотренном нами ранее). Спустя полпериода, язычок, переместившись, займет новое положение и так как полярность сегментов изменится на противоположную, переменное электрическое поле по-прежнему будет направлено навстречу движению язычков.

Своим основанием язычок скользит по поверхности перехода, непрерывно вбирая в себя из области сортировки электронов, находящиеся в благоприятной фазе. Вершина язычка последовательно ударяется в сегменты анода, всякий раз оставляя там порцию электронов. Сам язычок движется вдоль пространства взаимодействия, а образующие его электроны движутся в направлении от поверхности перехода — к аноду, поперек пространства взаимодействия, образуя ток магнетрона.

Как мы отмечали выше, переменное электрическое поле распределяется по пространству взаимодействия неравномерно: оно сильно у анода и слабо на поверхности перехода, у основания язычка. Однако его действие на язычок, создающееся поперек всей области обмена, можно заменить равнодействующей всех сил поля. Точка ее приложения к язычку должна располагаться в той части области обмена, где электрическое поле, взаимодействующее с язычком, сильнее, т. е. ближе к аноду. С другой стороны, суммарный заряд электронов, образующих язычок, тоже можно свести в одну точку и расположить его там, где оказалась равнодействующая сил переменного электрического поля. Эти точечные заряды, которыми мы заменили язычки, движутся вдоль пространства взаимодействия со скоростью V .

Если расстояние между анодом и катодом обозначить через d , то расстояние точки приложения равнодействующей сил переменного электрического поля от поверхности катода составит κd .

В большинстве практических случаев можно принимать $\kappa \approx 0,8$.

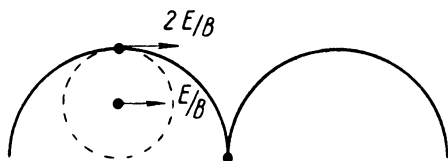


Рис. 3. Скорости движения электронов вдоль пространства взаимодействия

Поскольку в число задач данной книжки входит дать читателю возможность самому произвести приближенный расчет магнетрона, ниже будут даны некоторые несложные выводы основных формул и зависимостей. За основу взята система единиц СИ.

Первое соотношение. В области обмена энергией электроны непрерывно движутся в продольном и поперечном направлениях. Обратим внимание пока только на продольное движение электронов. Прежде всего определим, с какой скоростью будет происходить это движение. Если говорить об одном электроне, то можно насчитать по крайней мере три значения скорости его продольного движения: переносную (соответствующую воображаемому центру круга его вращения), на вершине циклоиды и, наконец, в самой нижней ее точке. Для наглядности приведен рис. 3. В нижней точке циклоиды продольная скорость движения электрона равна нулю, а в некоторых случаях может даже иметь обратное направление, правда, и в этом случае она оказывается по величине очень малой. Поэтому стрелка в этой точке не показана (см. рис. 3). Центр круга вращения электрона движется вдоль пространства взаимодействия со скоростью, равной отношению величины напряженности постоянного электрического поля E к величине индукции магнитного поля B , а на вершине циклоиды скорость электрона равна $2E/B$, т. е. вдвое превышает скорость движения центра. Если же говорить о большом количестве, т. е. о потоке электронов, то и в этом случае можно выделить все три указанных значения скорости. Какое же из них мы должны принимать во внимание?

Взаимодействие электронов с переменным электрическим полем тем интенсивнее, чем сильнее это поле. Переменное электрическое поле, как мы отмечали, резко нарастает в направлении от катода к аноду¹. Совершая циклоидальное дви-

¹ Ввиду сложности мы исключаем из рассмотрения ниготрон, в котором катод, подобно аноду, состоит из сегментов и щелей между ними, и в котором переменное электрическое поле вблизи поверхности катода так же сильно, как вблизи поверхности анода.

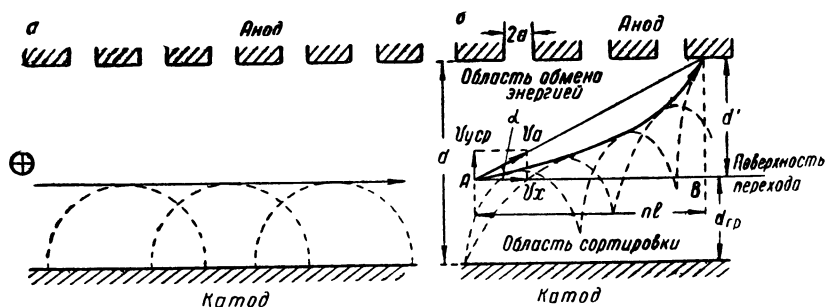


Рис. 4. Образование действующего потока электронов в негенерирующем (а) и генерирующем (б) магнетроне

жение, электроны попеременно попадают в области более и менее интенсивного электрического поля, причем так же попеременно будет нарастать и спадать их взаимодействие с полем.

Находясь в нижней части циклоиды и слабо взаимодействуя с переменным электрическим полем, электрон совершает движение главным образом в направлении поперек пространства взаимодействия. Вдоль пространства взаимодействия электрон на этом участке движется медленно, а в самой нижней точке циклоиды его скорость вообще обращается в нуль. Можно приближенно считать, что электрон, находящийся в нижней части циклоиды, с продольной составляющей переменного электрического поля вообще не взаимодействует.

Напротив, находясь в верхней части циклоиды, электрон около половины общей протяженности витка циклоиды движется со скоростью, приближенно равной ее значению в самой верхней точке циклоиды ($2E/B$), и испытывает наиболее сильное воздействие со стороны переменного электрического поля. Можно приближенно считать, что взаимодействие электрона с полем происходит только тогда, когда он находится в верхней части циклоиды.

Если рассматривать группу электронов, находящихся в фазе, благоприятной для взаимодействия с переменным электрическим полем, то траектории их движения, соответствующие верхним частям циклоид, сливаются в единый поток. На рис. 4 этот поток представлен сплошной жирной линией, а фактические траектории движения нескольких отдельных электронов, образующих поток, показаны тонкими пунктирными линиями. Рис. 4, а соответствует случаю отсутствия колебаний в магнетроне, здесь рассматриваемый поток протекает по поверхности перехода. Рис. 4, б соответствует случаю колебаний в магнетроне. Здесь истоком потока является поверх-

ность перехода, затем он пересекает область обмена энергией и прекращает свое существование на поверхности анодных сегментов. В дальнейшем будем такой поток называть действующим потоком электронов. Введение этого понятия никак не противоречит описанному выше механизму образования язычков в генерирующем магнетроне: язычки состоят из электронов, образующих действующий поток. Или иначе, язычки — это мгновенная фотография пространства взаимодействия, а действующий поток — это траектория, описываемая интересующими нас электронами в течение некоторого времени.

После сделанных предварительных замечаний сформулируем первое условие существования колебаний в магнетроне. Оно состоит в том, что скорость движения электронов в действующем потоке в направлении вдоль пространства взаимодействия V_x должна быть равна скорости распространения волны (колебаний) V вдоль колебательной системы магнетрона. Последняя может быть выражена через продольную протяженность ячейки пространства взаимодействия l и период T или частоту f генерируемых или усиливаемых магнетроном колебаний как $\frac{2l}{T}$ или как $2fl$. Приравняем оба значения скорости:

$$V = V_x \text{ или } \frac{2E}{B} = 2fl. \quad (5)$$

Отсюда напряженность постоянного электрического поля в пространстве взаимодействия, которую необходимо создать для того, чтобы в магнетроне могли действовать колебания:

$$E = Bfl. \quad (6)$$

Второе соотношение. Теперь остановимся на некоторых особенностях поперечного движения электронов. Это движение так же сложно, как и продольное, — электроны, взаимодействующие с переменным электрическим полем и образующие действующий поток, преодолевают расстояние от поверхности перехода до анода (рис. 4, б). Скорость движения электронов в поперечном направлении зависит от величины переменного электрического поля, с которым электроны взаимодействуют. Подлетая к аноду, электроны приобретают значительно большую скорость, чем та, с которой они начинали свое движение в поперечном направлении от поверхности перехода, потому что переменное электрическое поле у анода интенсивнее, чем на поверхности перехода. Само переменное электрическое поле в пространстве взаимодействия магнетрона образуется потому, что на щелях между сегментами анода действует переменное напряжение, имеющее амплитуду U_1 ,

которая связана с мощностью колебаний магнетрона P и сопротивлением колебательной системы Z соотношением:

$$U_1 = \sqrt{P'Z} = \sqrt{\frac{PZ}{\eta_k}}, \quad (7)$$

где P' — мощность колебаний, передаваемая электронами колебательной системе из пространства взаимодействия, а η_k — коэффициент полезного действия колебательной системы.

Расчет скорости поперечного движения электронов сложен, поэтому обычно рассматривают ее среднее значение $V_{\text{уср}}$, которое определяется как

$$V_{\text{уср}} = \frac{d'}{t_{\text{np}}}, \quad (8)$$

где d' — расстояние от поверхности перехода до поверхности анода (см. рис. 4, б), а t_{np} — время, затрачиваемое электронами, образующими действующий поток, на преодоление расстояния от поверхности перехода до анода. По существу такая замена сводится к представлению действующего потока электронов прямой линией. На рис. 4, б можно видеть, что действующий электронный поток (нанесен жирной линией) и заменяющая его прямая (сплошная тонкая линия) линия имеет только две общие точки — на поверхности перехода и на поверхности анода.

Путем решения уравнений и преобразований, которые мы здесь не приводим, для $V_{\text{уср}}$ может быть получено выражение

$$V_{\text{уср}} = \frac{U_1}{Bl} \frac{\sin ga}{ga} \frac{\text{sh } \kappa gd}{\text{sh } gd}, \quad (9)$$

где

$$g = \frac{\pi}{l}, \quad (10)$$

$2a$ — ширина щели между сегментами анода (см. рис. 4, б), d — расстояние между катодом и анодом и по-прежнему $\kappa \approx 0,8$.

Приравняв выражения для $V_{\text{уср}}$ друг другу, получим второе соотношение, описывающее закономерность движения электронов поперек пространства взаимодействия в генерирующем магнетроне:

$$t_{\text{np}} = \frac{Bl d'}{U_1} \frac{ga}{\sin ga} \frac{\text{sh } \kappa gd}{\text{sh } gd}. \quad (11)$$

Параметры магнетронов теперь представить нетрудно.

Мощность колебаний. Мощность наряду с частотой является важнейшим параметром колебаний. Частота колебаний магнетрона определяется свойствами его колебательной системы, а также внешним источником колебаний, если магнетрон работает в режиме усиления. Определим мощность

колебаний, создаваемых магнетроном. Если через магнетрон, находящийся в состоянии генерации колебаний, протекает ток I_a , а U_{a1} — та часть анодного напряжения, падающего на магнетроне, которая показывает энергию, полностью преобразуемую магнетроном в колебания, то мощность P' определится как произведение

$$P' = I_a U_{a1}, \quad (12)$$

а мощность на выходе магнетрона P будет равна:

$$P = \eta_k I_a U_{a1}. \quad (13)$$

Поскольку колебания в магнетроне поддерживаются за счет обмена энергией между электронами и переменным электрическим полем в области обмена, то U_{a1} определится как произведение напряженности постоянного электрического поля E , которую можно найти из выражения (6), и поперечного размера области обмена d' .

$$U_{a1} = B \beta d'. \quad (14)$$

Необходимо отметить, что в формулах (12) и (13) предполагается, что все электроны, образующие токопрохождение в магнетроне, участвуют в обмене энергией. Если же часть электронов выходит из пространства взаимодействия, не успев принять участие в обмене энергией, и оседает на элементах конструкции торцевых областей магнетрона, то создаваемый ими при этом ток утечки должен быть исключен из значений анодного тока I_a , представленных в указанных формулах. Кроме того, в усилительных магнетронах и ЛОВ типа «М» должна учитываться неравномерность распределения плотности электронов между отдельными ячейками пространства взаимодействия.

Анодное напряжение. Анодное напряжение магнетрона, помимо составляющей U_{a1} , показывающей энергию, полезно затрачиваемую на создание и поддержание колебаний, включает в себя также несколько составляющих, отражающих неизбежные потери энергии в этом приборе. В общем случае анодное напряжение магнетрона U_a включает в себя составляющие, обусловленные потерями на аноде и катоде, $U_{\text{пот. а}}$, $U_{\text{пот. к}}$ (имеются также другие составляющие). Найдем составляющую, обусловленную потерями на аноде.

Закончив прохождение области обмена энергией, электроны падают на поверхность анодных сегментов и отдают им всю оставшуюся у них энергию, которая превращается в тепло. Величина энергии определяется выражением

$$e U_{\text{пот. а}} = \frac{m V_a^2}{2}, \quad (15)$$

где e и m — соответственно заряд и масса электрона,

V_a — равнодействующая продольной V_x и поперечной V_y , составляющих скорости электронов, образующих действующий поток.

Скорость V_a , с которой электроны ударяются о поверхность анода, определяется выражением, которое мы предоставляем читателю вывести самому, пользуясь рис. 4, б

$$V_a = V_x \sqrt{1 + \left(\frac{d'}{nl}\right)^2}. \quad (16)$$

Здесь требуется лишь одно уточнение: расстояние, на которое смещаются электроны вдоль пространства взаимодействия за время прохождения ими области обмена энергией (на рис. 4, б расстояние между точками A и B), измеряется в длинах одной ячейки пространства взаимодействия nl , где l — по-прежнему длина ячейки пространства взаимодействия, а n — любое положительное число ячеек.

Таким образом, с использованием (5) мы можем записать:

$$U_{\text{пот. а}} = \frac{2m}{e} \beta^2 l^2 \left[1 + \left(\frac{d'}{nl}\right)^2\right]. \quad (17)$$

Потери на катоде значительно меньше потерь на аноде, и мы можем ими пренебречь. — Сложив составляющие (14) и (17), получим следующее выражение, определяющее анодное напряжение магнетрона U_a :

$$U_a = B f l d \left[1 + \left(\frac{d'}{nl}\right)^2\right]. \quad (18)$$

Здесь мы учли, что (см. рис. 4, б)

$$d' = d - d_{\text{гп}}, \quad (19)$$

$$d_{\text{гп}} = \frac{2m f l}{e B}, \quad (20)$$

Величина n , входящая в выражение (18), определяет зависимость анодного напряжения на магнетроне от интенсивности генерируемых им колебаний.

Коэффициент полезного действия. Определим КПД магнетрона как отношение мощности генерируемых им колебаний P к мощности, подводимой к магнетрону от источника питания $P_{\text{подв}}$. Первая определяется выражением (13), вторая представляет собой произведение анодного напряжения U_a на анодный ток I_a , протекающий через магнетрон при генерации. С учетом (13) и (18) коэффициент полезного действия магнетрона η_m определится так:

$$\eta_m = \eta_k \eta_s, \quad (21)$$

где

$$\eta_s = \frac{d'}{d} \frac{1}{1 + \left(\frac{d'}{nl}\right)^2}. \quad (22)$$

Принято называть η_s электронным коэффициентом полезного действия магнетрона.

рабочая характеристика

Рассмотренные выше параметры: мощность генерируемых колебаний, анодный ток, анодное напряжение и коэффициент полезного действия являются одними из самых важных, определяющих в практике использования магнетронов. Наиболее полное представление об этих параметрах и их взаимосвязи дает так называемая рабочая характеристика, примерный вид которой изображен на рис. 5. На графике по горизонтальной оси отложены значения анодного тока I_a , по вертикальной — анодного напряжения U_a , сплошными наклонными прямыми линиями нанесены зависимости напряжения от тока для нескольких значений индукции магнитного поля B . Здесь можно также видеть две группы кривых линий. Сплошными кривыми линиями соединены одинаковые значения мощности P , генерируемой магнетроном, пунктирными кривыми линиями — некоторые равные значения коэффициента полезного действия прибора η .

Казалось, имея рабочую характеристику, очень просто можно выбрать режим работы и параметры магнетрона. Достаточно задаться значениями анодного тока и магнитного поля из числа представленных на характеристике, чтобы найти, какие соответствуют им значения анодного напряжения, отдаваемой мощности и коэффициента полезного действия. Если полученные величины почему-либо не устраивают, то можно задаться новым значением тока или магнитного поля и т. д. Однако рабочая характеристика не дает такой свободы выбора. Дело в том, что не только отдаваемая мощность, анодное напряжение и КПД зависят от выбора индукции магнитного поля и анодного тока. От них зависят также некоторые другие параметры магнетрона и прежде всего те, которые определяют стабильность и устойчивость его работы.

Перейдем к рассмотрению некоторых тонких, на первый взгляд незаметных свойств магнетрона.

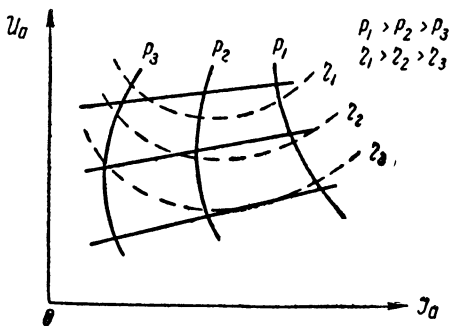


Рис. 5. Рабочая характеристика магнетрона

малое, но важное

До сих пор мы предполагали, что постоянное электрическое поле в пространстве взаимодействия магнетрона распределено равномерно. Ничего плохого в этом нет, и во многих случаях такое предположение является вполне оправданным. Однако некоторая неравномерность постоянного электрического поля в пространстве взаимодействия магнетрона все же имеется. Она обусловлена неравномерностью поверхности анода, обращенной к катоду, заключающейся в том, что анод состоит из сегментов, разделенных щелями. Посмотрим, к чему это может привести.

До сих пор мы принимали, что поверхность перехода представляет собой плоскость, удаленную от поверхности катода на расстояние $d_{гр}$. Однако при более пристальном рассмотрении, которое первым осуществил П. Л. Капица [2], на ней проступает волнистость. Под сегментами постоянное электрическое поле более интенсивно, чем под щелями. У поверхности катода, который мы здесь принимаем сплошным, указанная неравномерность постоянного электрического поля исчезает, а у поверхности анода, напротив, достигает своего максимального значения.

В подавляющем большинстве практических случаев $d_{гр} = (0,1 \div 0,3)d$, и рассматриваемая неравномерность составляет малые доли процента, в чем можно убедиться, рассмотрев приводимую ниже формулу:

$$\frac{\Delta d_{гр}}{d_{гр}} = \frac{1}{\pi} \frac{l}{b} \frac{\text{sh} 2gd_{гр}}{\text{sh} 2gd} \sin 2ga. \quad (23)$$

Все величины, входящие в формулу, нам известны из предыдущего, $\Delta d_{гр}$ — амплитуда отклонения $d_{гр}$ от его среднего значения.

Однако, как мы сейчас покажем, даже очень малая неравномерность поверхности перехода может привести к существенному снижению частотной стабильности магнетрона.

В генерирующем магнетроне электронные язычки движутся вдоль пространства взаимодействия с той же скоростью, с которой распространяется волна колебаний вдоль колебательной системы, и непрерывно вбирают в себя электроны, пересекающие поверхность перехода и находящиеся в фазе, благоприятной для взаимодействия. Верхушки язычков скользят по сегментам анода, также непрерывно оставляя на них отработанные электроны. Если поверхность перехода равномерна, то никаких особенностей в этом процессе заметить невозможно. Иное дело — неравномерная поверхность!

Электроны, захваченные в действующий электронный по-

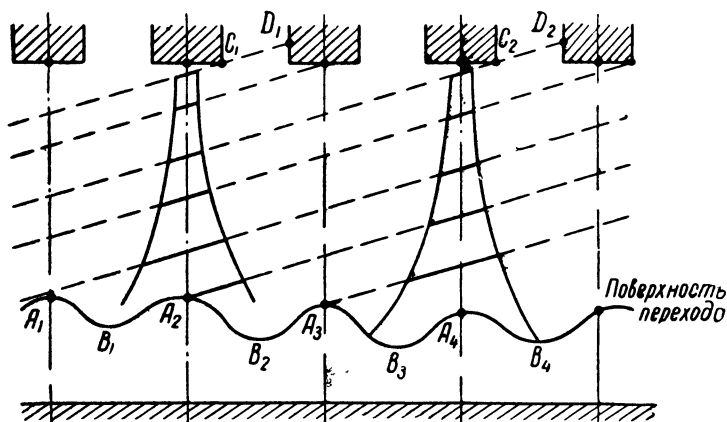


Рис. 6. Образование неравномерной плотности электронов по высоте язычка за счет неравномерности поверхности перехода.

ток в точках A поверхности перехода (см. рис. 6), быстрее достигнут анода, нежели электроны, вошедшие в соответствующий язычок в точках B . Электроны, поступившие в язычок в точке A , на всем пути до анода будут находиться во взаимодействии с относительно более сильным переменным электрическим полем, чем другие электроны. Наконец, нагнав электроны, вошедшие в область обмена несколько ранее их, они образуют относительное сгущение электронов. Значит, всякий раз, когда язычок будет проходить под очередным сегментом анода, в нем будет образовываться некоторое сгущение электронов, и язычок приобретет по своей высоте периодическую неравномерность плотности электронов. Сказанное иллюстрируется на рис. 6. Действующие электронные потоки, начинающиеся из точек $A_1, A_2, A_3 \dots$ поверхности перехода, нанесены пунктирными линиями, контуры язычков пространственного заряда — сплошными и сгущения электронов в язычках — жирными сплошными линиями.

Число сгущений в каждом из язычков по его высоте равно числу ячеек пространства взаимодействия, пролетаемых электронами на пути от поверхности перехода до анода. Выше это число мы обозначили через n , которое в общем случае не является целым. Поэтому число сгущений определяется лишь числом полных ячеек, пройденных электронами. При изменении величины переменного электрического поля, с которым электроны взаимодействуют, т. е. при изменении мощности колебаний, генерируемых магнетроном, число сгущений в язычках будет изменяться: снижение поля приведет к увеличению их числа и, наоборот, возрастание поля вызовет уменьшение числа сгущений.

Если некоторые сгущения проходят вблизи углов $C_1, C_2 \dots$ сегментов анода, то в зависимости от малых изменений рабочего режима магнетрона электроны, образующие эти сгущения, могут упасть на анод в точках $C_1, C_2 \dots$ или $D_1, D_2, \dots$ последующих сегментов. Изменение состояния магнетрона будет происходить при этом скачкообразно, скачком изменятся его параметры. Величина скачка определяется величиной $\Delta d_{\text{гр}}$. Приближенно в магнетроне

$$\frac{\Delta d_{\text{гр}}}{d} = \frac{\Delta U_a}{U_a} = \frac{\Delta f}{f}, \text{ где} \quad (24)$$

ΔU_a — изменение анодного напряжения при скачке,

Δf — изменение частоты колебаний, генерируемых магнетроном, при скачке.

Поэтому возможное скачкообразное изменение частоты колебаний магнетрона в режимах, соответствующих неопределенности точек попадания электронов, образующих сгущения, на анод, может быть найдено с помощью выражения:

$$\Delta f = 2 \frac{a}{b} \frac{\text{sh} 2gd_{\text{гр}}}{\text{sh} 2gd} \frac{\sin 2ga}{2ga} f. \quad (25)$$

В ряде практических случаев уход частоты колебаний, генерируемых магнетроном, на 1 МГц является значительным. Так, например, для магнетрона, работающего на частоте $f = 10000 \text{ МГц}$, неравномерность поверхности перехода, составляющая всего $0,01\%$, является уже существенной!

зоны режимов

Как видим, работа магнетрона в режимах, соответствующих точкам разрыва, является нежелательной, а во многих практических случаях и недопустимой. Поскольку при монотонном изменении интенсивности колебаний, генерируемых магнетроном, точки разрыва возникают с определенной периодичностью, введено понятие о зонах рабочих режимов магнетрона. В качестве границ зон рабочих режимов выбраны точки разрыва. Зонам присвоены номера $i = 1, 2, 3 \dots$, соответствующие числу ячеек (щелей между сегментами анода), пролетаемых электронами в области обмена энергией. Поскольку за время пролета электронами одной ячейки пространства взаимодействия проходит половина периода колебаний, генерируемых магнетроном ($T/2$), то, учитывая, что всего электроны пролетают n ячеек, мы можем определить время пролета электронами области обмена $t_{\text{пр}}$ как

$$t_{\text{пр}} = \frac{T}{2} n = \frac{n}{2f}. \quad (26)$$

Но для $t_{пр}$ мы уже ранее нашли выражение (11). Приравняем его к выражению (26) и получим, учтя выражение (14), значение U_1

$$U_1 = \frac{2U_{a1}}{n} \frac{ga}{\text{singa}} \frac{\text{shgd}}{\text{sh*gd}}. \quad (27)$$

Амплитуду переменного напряжения на щелях колебательной системы магнетрона U_1 можно также определить, пользуясь обычными радиотехническими методами, через мощность P' , для которой мы выше нашли выражение (12), и полное сопротивление колебательной системы магнетрона Z :

$$U_1 = \sqrt{2P'Z} = \sqrt{2U_{a1}I_a Z}. \quad (28)$$

Приравняв друг другу (27) и (28), определим величину анодного тока I_a :

$$I_a = \frac{2U_{a1}}{n^2 Z} \left(\frac{ga}{\text{singa}} \right)^2 \left(\frac{\text{shgd}}{\text{sh*gd}} \right)^2. \quad (29)$$

В том случае, когда на пути от поверхности перехода до поверхности анода электроны проходят ровно одну ячейку пространства взаимодействия ($n=1$), мы будем считать, что анодный ток магнетрона имеет значение, которое назовем характеристическим, $I_{a \text{ хар.}}$:

$$I_{a \text{ хар.}} = \frac{2U_{a1}}{Z} \left(\frac{ga}{\text{singa}} \right)^2 \left(\frac{\text{shgd}}{\text{sh*gd}} \right)^2. \quad (30)$$

Характеристическое значение анодного тока определяется конструкцией магнетрона и величиной индукции приложенного к нему магнитного поля. Окончательно для I_a можем записать такое выражение:

$$I_a = \frac{I_{a \text{ хар.}}}{n^2}. \quad (31)$$

Нам осталось наметить границы зон рабочих режимов магнетрона. Это несложно сделать, воспользовавшись рис. 7. Точки разрыва будут иметь место при значениях $n = n_{\text{разр. } i}$:

$$n_{\text{разр. } i} = \frac{2(a+b)i+b}{2(a+b)},$$

т. е. разрывы будут иметь место в тех случаях, когда анодный ток будет принимать значения $I_a = I_{a \text{ разр. } i}$:

$$I_{a \text{ разр. } i} = \frac{I_{a \text{ хар.}}}{\left[i + \frac{1}{2 \left(\frac{a}{b} + 1 \right)} \right]^2}. \quad (32)$$

Если величина анодного тока магнетрона превышает $I_{a \text{ разр. } 1}$, мы будем говорить, что прибор работает на первой

зоне рабочих режимов, при $I_{a \text{ разр. } 1} > I_a > I_{a \text{ разр. } 2}$ — на второй, при $I_{a \text{ разр. } 2} > I_a > I_{a \text{ разр. } 3}$ — на третьей и т. д.

Выбор режима магнетрона. Какой режим выбрать, чтобы магнетрон работал стабильнее, надежнее и обеспечивал желаемые параметры? Этот вопрос всегда возникает при использовании магнетрона. Условий и ограничений всегда оказывается очень много, мы остановимся лишь на некоторых из них.

Первое ограничение мы только что рассмотрели: анодный ток магнетрона должен выбираться так, чтобы он не был равен или не был близок какому-либо значению $I_{a \text{ разр. } i}$ определяемому выражением (32).

Очень важен выбор номера зоны рабочих режимов. С точки зрения получения возможно большей мощности от магнетрона некоторой заданной конструкции необходимо, чтобы номер зоны был возможно меньшим. Подавляющее большинство импульсных магнетронов работает на второй зоне рабочих режимов. Увеличение анодного тока до значений, соответствующих первой зоне рабочих режимов, на практике обычно не удается из-за чрезмерного возрастания амплитуды переменного напряжения на щелях между сегментами анода U_1 и возникновения электрических пробоев и искрений в щелях.

Магнетроны непрерывного действия работают, как правило, в зонах с номерами, превышающими $4 \div 6$. Работа магнетрона непрерывного генерирования во второй зоне рабочих режимов может рассматриваться пока как исключение. Ограничение здесь накладывается величиной мощности, которую можно рассеивать на сегментах анода, а также на катode магнетрона.

Зоны с меньшими номерами выгодны еще и тем, что они относительно шире зон с большими номерами, причем с увеличением номера зоны ее сужение происходит достаточно резко. При наличии узкой зоны рабочих режимов существенно возрастают требования к стабильности источника питания магнетрона.

Внутри выбранной зоны рабочих режимов не все значения анодного тока равноценны. Наиболее стабильно магнетрон работает в точке оптимального режима при токе $I_{a \text{ опт. } i}$, который соответствует движению электронов по траектории АВ (см. рис. 7), проходящей на уровне границы анода (на рис. 7 нанесена пунктиром) через точку С, расположенную в середине щели. Для $I_{a \text{ опт. } i}$ может быть записано следующее выражение:

$$I_{a \text{ опт. } i} = \frac{I_{a \text{ хар.}}}{(i - 0,5)^2}. \quad (33)$$

Магнитное поле магнетрона В также не может быть произвольным. Описанный выше механизм действия магнетрона

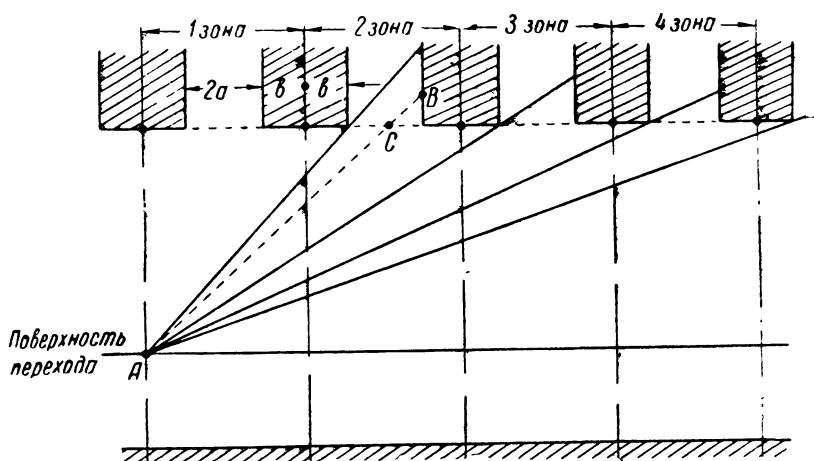


Рис. 7. Границы зон рабочих режимов

основан на том, что, как уже отмечалось, важную роль при взаимодействии электронов с полем играет вращательное движение электронов вокруг воображаемого центра их вращения, причем электроны отдают энергию полю, находясь в верхней части циклоиды. Энергия вращательного движения электронов должна при этом как-то восполняться. Если проанализировать опытные данные о величинах магнитного поля реальных магнетронов, то оказывается, что они группируются вокруг значения

$$B_{\text{опт.}} = \frac{m}{e} 4\pi f, \quad (34)$$

которое мы будем называть оптимальным и которое соответствует тому, что в оптимальном режиме частота циклотронных (вращательных) колебаний электронов вдвое больше частоты колебаний, генерируемых магнетроном.

цилиндрический магнетрон

Все закономерности, полученные нами применительно к плоскому магнетрону, справедливы и для магнетрона цилиндрической конструкции, у которого поверхности анода и катода могут рассматриваться как цилиндрические, коаксиальные друг другу. Только при расчете параметров и характеристик цилиндрического магнетрона необходимо учиты-

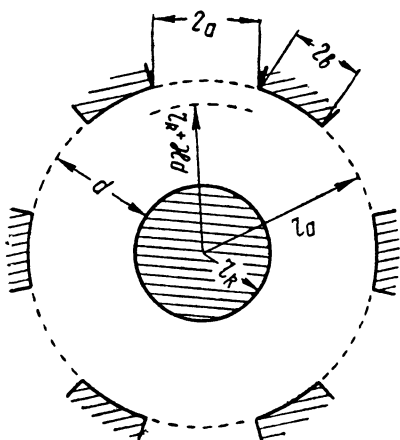


Рис. 8. Геометрические размеры пространства взаимодействия цилиндрического магнетрона

Здесь:

$$d = r_a - r_k, \quad (36)$$

r_a и r_k — соответственно радиусы анода и катода,

N — число сегментов (щелей между сегментами) колебательной системы магнетрона.

другие виды колебаний

До сих пор мы ограничивались рассмотрением случая работы магнетрона на противофазном («л») виде колебаний. Однако многие реальные магнетроны работают на видах колебаний, отличных от противофазного. Рассмотрим особенности таких магнетронов. Прежде всего в этом случае геометрическая протяженность ячейки пространства взаимодействия l не совпадает с ее электрической протяженностью на некотором рассматриваемом виде колебаний l_s . Поэтому прежде чем применить полученные выше формулы к магнетрону, работающему на виде колебаний, отличном от противофазного, в них необходимо внести некоторые уточнения.

Как говорилось в начале книжки, важным параметром любой колебательной системы является коэффициент замедления k_s , определяемый выражением (4). Поскольку в магнетроне, работающем на противофазном виде колебаний, $l_s = l$, у нас до сих пор не было большой надобности в использовании вы-

вать, что протяженность ячейки пространства взаимодействия l в цилиндрическом магнетроне не равна сумме ширины сегмента и ширины щели $2b + 2a$, как это имеет место в магнетроне плоской конструкции. В цилиндрическом магнетроне расстояние l измеряется на уровне действия равнодействующей сил переменного электрического поля в пространстве взаимодействия, на расстоянии x d от поверхности катода (см. рис. 8):

$$l = \frac{2\pi(r_k + x d)}{N} \quad (35)$$

ражения (4). Теперь такая надобность появилась. Переписав выражение (5) в таком виде

$$V_x = 2fl_0, \quad (37)$$

подставим его в выражение (4), преобразуем и получим

$$l_0 = \frac{c}{2k_3 f}, \quad (38)$$

где c — скорость света в вакууме,

k_3 — коэффициент замедления колебательной системы магнетрона, отсчитываемый в пространстве взаимодействия на расстоянии x_d от поверхности катода.

Таким образом, зная из опыта или расчета коэффициент замедления колебательной системы k_3 , мы можем с помощью выражения (38) найти электрическую протяженность ячейки пространства взаимодействия любого магнетрона.

Колебательные системы магнетронов могут быть разомкнутыми, т. е. имеющими начало и конец, и замкнутыми — в них колебания непрерывно описывают замкнутые циклы вдоль колебательной системы. Для магнетронов, работающих не на противофазном виде колебаний и имеющих замкнутые колебательные системы (такие системы могут, естественно, иметь только магнетроны цилиндрической конструкции), электрическую длину ячейки пространства взаимодействия можно определить, пользуясь и таким выражением:

$$l_0 = 2l \left| \frac{p}{N} + m \right|, \quad (39)$$

где l — по-прежнему протяженность ячейки пространства взаимодействия на противофазном виде колебаний, определяемая геометрией пространства взаимодействия,

$|p + Nm|$ — число полных периодов колебаний, укладываемых по окружности анода цилиндрического магнетрона с замкнутой колебательной системой,

N — число сегментов (щелей) колебательной системы магнетрона.

Расчет магнетрона, работающего на виде колебаний, отличным от противофазного, может производиться по тем же формулам, но вместо l в них должно быть всюду подставлено значение l_0 , найденное с помощью одного из вышеприведенных выражений (38) или (39). Необходимо только учитывать, что коэффициент замедления k_3 , входящий в выражение (38), в случае цилиндрического магнетрона отличается от коэффициента замедления, которым обычно характеризуют колебательные системы. Дело в том, что общепринятый коэффициент замедления (мы обозначим его через k'_3) отсчитывается по

поверхности колебательной системы, обращенной в пространство взаимодействия (он отсчитывается по поверхности сегментов анода, обращенной к катоду). В нашем случае коэффициент замедления k_3 отсчитывается на уровне действия равнодействующей сил переменного электрического поля в пространстве взаимодействия $\times d$. Оба значения коэффициента замедления связаны между собой соотношением:

$$k_3 = \frac{r_k + \kappa d}{r_a} k_3'. \quad (40)$$

Определение зон рабочих режимов магнетрона основано на учете геометрических особенностей пространства взаимодействия. Поэтому выражения для границ зон рабочих режимов и оптимальных точек в пределах зон также видоизменяются. При расчете магнетрона, работающего на виде колебаний, отличном от противофазного, вместо выражения (32) должно использоваться выражение

$$I_{a \text{ разр. } i} = \frac{I_{a \text{ хар.}}}{\left[1 + \frac{1}{2 \left(\frac{a}{b} + 1 \right)} \right]^2 \left(\frac{l}{l_3} \right)^2} \quad (41)$$

и вместо выражения (33) выражение

$$I_{a \text{ опт. } i} = \frac{I_{a \text{ хар.}}}{(i - 0,5)^2} \left(\frac{l}{l_3} \right)^2. \quad (42)$$

ТИПЫ МАГНЕТРОНОВ

В основе любого магнетрона лежит пространство взаимодействия, в котором электрически заряженные частицы, находящиеся под воздействием электрического и магнитного полей, не совпадающих между собой по направлению, обмениваются энергией с электрическим полем. Однако формы существования магнетронного колебательного процесса могут быть самыми разнообразными, и ограничить число видов магнетронов в настоящее время не представляется возможным. Мы только что говорили о том, что магнетроны помимо плоской могут иметь цилиндрическую конструкцию, что колебательная система магнетрона может быть и замкнутой и разомкнутой, что в пространстве взаимодействия можно насчитать много различных видов колебаний. Но все это только малая часть того, чем различаются магнетроны.

На рис. 9 представлены функциональные элементы, связанные с пространством взаимодействия магнетрона и опреде-

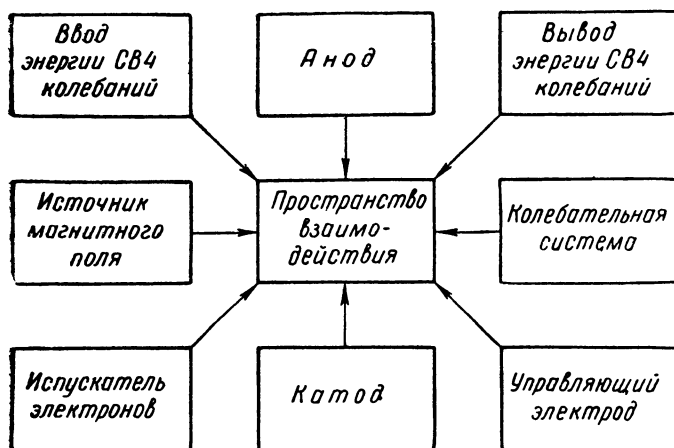


Рис. 9. Функциональные элементы, связанные с пространством взаимодействия магнетрона и определяющие конкретные условия генерирования и вид прибора

ляющие условия генерирования и вид прибора. Катод и анод ограничивают пространство взаимодействия в поперечном направлении. Они создают необходимое электрическое поле в пространстве взаимодействия, имеющее постоянную, а также переменные составляющие. Анод, катод либо оба электрода одновременно могут быть сплошными или могут быть составлены из сегментов, разделенных щелями. В каждом из этих случаев при прочих равных условиях можно говорить об одном или одновременно нескольких самостоятельных видах магнетронов.

Колебательная система может состоять из одного-единственного или системы колебательных контуров, которые могут иметь (а могут и не иметь) орган перестройки частоты. Колебательная система может быть рассчитана на одну частоту или на полосу частот. Соответственно говорят о коаксиальном и многорезонаторном магнетронах, о магнетроне на фиксированную частоту и магнетроне с перестраиваемой частотой, о монохроматическом и полосовом устройстве.

Магнетрон, предназначенный для генерирования колебаний, имеет только вывод энергии СВЧ-колебаний. Магнетрон, предназначенный для усиления колебаний, имеет помимо того еще ввод энергии СВЧ-колебаний, подлежащих усилению.

Испускатель электронов в одних магнетронах представляет собой единое целое с катодом, в других он находится на катоде, но отделен от него, в третьих испускатель вообще выносится из пространства взаимодействия. Наличие или отсутствие управляющего электрода является также причиной деления магнетронов на виды.

Познакомимся кратко с некоторыми из видов магнетронов, получивших наибольшее распространение в практике.

Многорезонаторный магнетрон. Многорезонаторный магнетрон получил в практике наибольшее распространение. Устройство его схематически показано на рис. 10, а. Цилиндрический катод помещен внутрь анодной системы, сочетающей в себе и сегменты анода, обеспечивающие необходимое распределение переменного электрического поля в пространстве взаимодействия магнетрона, и систему резонансных контуров. Многорезонаторный магнетрон является автогенератором, поэтому он имеет один вывод энергии СВЧ-колебаний. В подавляющем большинстве случаев работает на противофазном виде колебаний, хотя может генерировать и на других видах колебаний. Катод в многорезонаторном магнетроне сочетает в себе функции электрода, обеспечивающего необходимое распределение электрического поля в пространстве взаимодействия, и испускателя электронов. Поверхность его состоит из вещества, обладающего хорошими эмиссионными свойствами. Температура рабочей поверхности катода, необходимая для эмиссии с нее электронов, обеспечивается подогревателем, который на рисунке не показан.

Многорезонаторный магнетрон имеет большое число разновидностей, связанных с работой его в импульсном и непрерывном режимах, наличием перестройки частоты, конструкцией колебательной системы и вывода энергии. Магнетрон, в котором магнитная система объединена с ним в единое целое, получил наименование пакетированного. Если магнетрон предназначен для использования с отдельной магнитной системой, он называется напакетированным.

ЛОВ типа «М». Лампа обратной волны магнетронного типа (ЛОВ типа «М») стала известна сравнительно недавно — в 1952—1954 гг. Однако благодаря своим свойствам она получила к настоящему времени достаточно широкое распространение. Устройство ЛОВ типа «М» схематически показано на рис. 10, б. Она состоит из так называемого «холодного» катода, замедляющей системы (анода), испускателя электронов и управляющего электрода. Испускатель электронов располагается вне пространства взаимодействия. Замедляющая система имеет единое целое с сегментами анода. Назначение управляющего электрода — обеспечить наиболее благоприятные условия поступления электронов от испускателя в пространство взаимодействия. Вывод энергии располагается на том конце замедляющей системы (анода), который обращен к испускателю. На другом конце замедляющей системы, которая в данном случае, естественно, является разомкнутой, помещают поглотитель энергии СВЧ-колебаний. Он предупреждает нежелательные отражения энергии в этой части замедляющей системы. Пунктиром на рисунке нанесена траектория

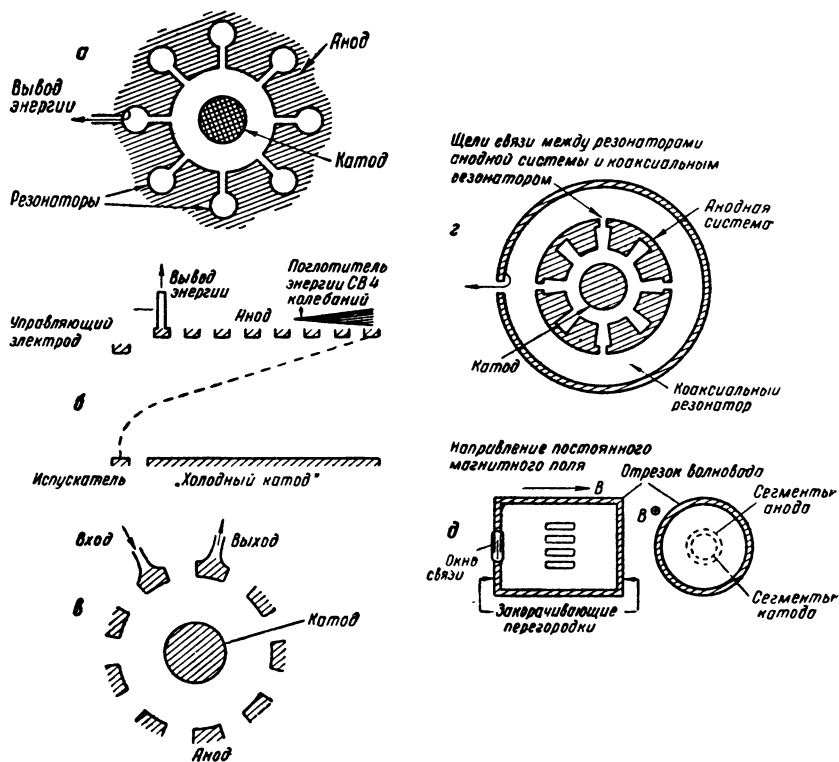


Рис. 10. Типы магнетронов: а — многорезонаторный магнетрон, б — ЛОВ типа «М», в — амплитрон, г — коаксиальный магнетрон, д — ниготрон

электронов, образующих действующий поток. На предыдущем, данном и двух последующих рисунках мы не показываем направления магнитного поля, считая само собой разумеющимся, что его силовые линии идут от читателя за чертеж. То анодное напряжение, о котором мы говорили выше, прикладывается к ЛОВ типа «М» между анодом и «холодным» катодом, хотя на практике чаще всего под анодным напряжением данного прибора понимается напряжение, приложенное между испускателем и анодом. Эту разницу необходимо учитывать при использовании описываемого метода.

Главной особенностью ЛОВ типа «М» является то, что она позволяет в широких пределах производить перестройку частоты электрическим способом, за счет изменения анодного напряжения. Пределы изменения частоты могут достигать 20 и 30% по отношению к средней частоте диапазона ЛОВ. Однако если наряду с изменением частоты колебаний, генерируемых ЛОВ типа «М», требуется обеспечить высокую стабиль-

ность в любой заданной точке диапазона перестройки, то повышенные требования предъявляются к стабильности напряжений, подаваемых на ЛОВ от источника питания.

Амплитрон. Амплитроном называется магнетрон, предназначенный для работы в режиме усиления СВЧ-колебаний. Он состоит из эмиттирующего катода и анода в виде замедляющей системы. Последняя разомкнута. К одному ее концу подключен вход энергии СВЧ-колебаний, подлежащих усилению. К другому ее концу подключен вывод энергии колебаний, усиленных амплитроном. Число сегментов анода, как правило, бывает нечетное. Этим обеспечивается развязка выхода лампы от ее входа (см. рис. 10, в).

Амплитрон способен усиливать колебания в полосе 5—10%. Он является нелинейным усилителем. С ростом амплитуды сигнала, подаваемого на его вход, коэффициент усиления амплитрона снижается. Объясняется это тем, что с ростом амплитуды колебаний в амплитроне уменьшается номер зоны рабочих режимов. После того как номер зоны сравняется с числом сегментов анодной системы амплитрона, создается такое положение, что все возрастающее число ячеек пространства взаимодействия оказывается в совершенно одинаковых условиях, имея равную амплитуду колебаний. Значит, с ростом амплитуды колебаний, подаваемых на вход амплитрона, остается все меньшее число ячеек, на которых может образовываться усиление колебаний. Так, при работе амплитрона на второй зоне рабочих режимов подобных ячеек останется всего две. Коэффициент усиления амплитрона при этом составляет всего 5—7 дБ. При больших номерах зон рабочих режимов коэффициент усиления амплитрона достигает 15—20 дБ [6].

Коаксиальный магнетрон. В последние годы особую популярность приобрела разновидность многорезонаторного магнетрона, называемого коаксиальным. Его успех объясняется более высокой стабильностью по частоте в сравнении с обычным многорезонаторным магнетроном. Устройство коаксиального магнетрона схематически показано на рис. 10, г. Как обычно, эмиттирующий катод располагается в центре конструкции. Его окружает многорезонаторная анодная система. На этом заканчивается сходство с многорезонаторным магнетроном. В коаксиальном магнетроне каждый второй резонатор снабжен специальными щелями связи, связывающими его с внешним (по отношению к резонаторной системе), общим для всего магнетрона, коаксиальным резонатором. Высокая частотная стабильность коаксиального магнетрона определяется высокой добротностью коаксиального резонатора. Вывод энергии магнетрона связан с коаксиальным резонатором. Силовые линии магнитного поля, как и в предыдущих случаях, направлены от читателя за чертеж.

Коаксиальный магнетрон имеет особенно высокую ста-

бильность в диапазоне волн порядка 2—3 см. При попытках создания коаксиальных магнетронов на длину волны, превышающую 5—6 см, возникают серьезные затруднения, связанные со значительным увеличением габаритов прибора. Поэтому развитие коаксиальных магнетронов в основном происходит в коротковолновой части сантиметрового диапазона [6].

Ниготрон. Схематически устройство ниготрона видно из рис. 10, д. С целью упрощения на рисунке не показан внешний по отношению к ниготрону соленоид, создающий магнитное поле B , направленное вдоль оси волноводной части прибора. По замыслу его создателя академика П. Л. Капицы, вдоль электрических силовых линий волны H_{01} круглого волновода размещается пространство взаимодействия магнетрона [7]. Функции резонаторной системы отданы при этом отрезку указанного круглого волновода, с двух концов перекрытого металлическими стенками. Чтобы вывести энергию колебаний, генерируемых ниготроном, наружу, во внешние цепи, одна из перекрывающих волновод металлических стенок снабжена круглым отверстием — окном связи, в которое вставлена пластина из вакуумпрочного материала с малыми потерями, пригодного для работы на больших уровнях мощности.

Катод ниготрона выполнен не сплошным, а подобно аноду, образуется системой сегментов. Так сделано потому, что в противном случае электрические силовые линии частично замыкались бы через металл катода, и колебания, генерируемые ниготроном, были бы вследствие потерь значительно ослаблены. Эмиссия электронов в пространство взаимодействия происходит не с катода, а от специальных испускателей, которые устанавливаются на некоторой части катодных сегментов в специальных углублениях.

Процесс взаимодействия электронов с переменным электрическим полем совершается в ниготроне несколько иначе, чем в магнетроне. Поскольку переменное электрическое поле имеет наибольшую интенсивность не только вблизи поверхности анода, но и вблизи катода, здесь иная форма язычков пространственного заряда. Число язычков относительно вдвое больше, чем в магнетроне, работающем на противофазном виде колебаний. Как мы упоминали ранее, в ниготроне взаимодействие электронов с полем осуществляется на виде колебаний, который называется « $\pi/2$ ». В ниготроне иначе происходит смена потенциалов сегментов по отношению друг к другу. Область сортировки электронов в пространстве взаимодействия ниготрона практически отсутствует.

Здесь нет возможности останавливаться на таких важных конструктивных деталях и узлах ниготрона, как элементы крепления сегментов анода и катода, а также крепления испускателей, цепи подводы к электродам напряжений анода и подогрева испускателей и т. д.

рассчитаем магнетрон

Прежде чем привести примеры расчета магнетрона, перепишем основные формулы, необходимые для расчета, в более удобном виде, перейдя к единицам, обычно используемым на практике. Анодный ток будем выражать в амперах (a), анодное напряжение — в киловольтах ($кв$), индукцию магнитного поля $\Rightarrow$ в гауссах ($гс$), мощность — в киловаттах ($квт$), частоту — в гигагерцах ($Ггц$), сопротивление — в омах ($ом$), длину — в сантиметрах ($см$). Кроме того учтем, что $e/m = 1,76 \cdot 10^{11}$ кул/кг и $c = 3,00 \cdot 10^8$ м/сек.

С учетом сказанного вместо выражения (14) мы должны записать:

$$U_{a1} = 0,01 B f l d', \quad (43)$$

вместо выражения (18):

$$U_a = 0,01 B f l d \left[1 + \left(\frac{d'}{nl} \right)^2 \right], \quad (44)$$

вместо выражения (20):

$$d_{\text{гр}} = \frac{114 f l}{B}, \quad (45)$$

вместо выражения (30):

$$I_{a \text{ хар.}} = \frac{2 \cdot 10^3 U_{a1}}{Z} \left(\frac{ga}{\sin ga} \right)^2 \left(\frac{\text{sh} gd}{\text{sh } \pi gd} \right)^2, \quad (46)$$

вместо выражения (34):

$$B_{\text{опт.}} = 715 f, \quad (47)$$

вместо выражения (38):

$$l_3 = \frac{15}{f k_3}. \quad (48)$$

Остальные выражения в преобразованиях не нуждаются. Теперь перейдем к примерам расчета.

Пример 1. Пусть нам известны геометрические размеры внутреннего устройства некоторого цилиндрического магнетрона с замкнутой колебательной системой, предназначенного для работы в импульсном режиме на частоте $f = 2,8$ Ггц: $r_a = 0,8$ см; $r_k = 0,3$ см; $2a = 0,23$ см; $N = 8$; $Z = 565$ см; $\gamma_k = 0,9$.

Требуется определить его параметры в оптимальном режиме.

Прежде всего найдем оптимальное значение индукции магнитного поля (48)

$$B_{\text{опт}} = 715 f = 2000 \text{ гс},$$

затем расстояние между катодом и анодом (36)

$$d = r_a - r_k = 0,5 \text{ см},$$

далее протяженность ячейки пространства взаимодействия (35)

$$l = \frac{2\pi(r_k + 0,8d)}{8} = 0,55 \text{ см},$$

поперечный размер области сортировки электронов (45)

$$d_{rp} = \frac{114fl}{B} = 0,088 \text{ см},$$

поперечный размер области обмена энергией (19)

$$d' = d - d_{rp} = 0,412 \text{ см},$$

ширину сегмента анода

$$2b = \frac{2\pi r_a}{N} - 2a = 0,4 \text{ см},$$

составляющую анодного напряжения U_{a1} (43)

$$U_{a1} = 0,01 Bfld' = 12,7 \text{ кв.}$$

множитель в (46) с помощью графиков, приведенных на рис. 11,

$$\left(\frac{ga}{\sin ga}\right)^2 \left(\frac{\operatorname{sh} gd}{\operatorname{sh} \pi gd}\right)^2 = 3,6,$$

характеристическое значение анодного тока (46)

$$I_{a \text{ хар.}} = \frac{2U_{a1}}{Z} \left(\frac{ga}{\sin ga}\right)^2 \left(\frac{\operatorname{sh} gd}{\operatorname{sh} \pi gd}\right)^2 \cdot 10^3 = 162 \text{ а},$$

оптимальное значение анодного тока для второй зоны рабочих режимов, для которой $i=2$ (33)

$$I_{a \text{ опт } 2} = \frac{I_{a \text{ хар.}}}{2,25} = 72 \text{ а}.$$

Выполнив все предварительные расчеты, мы имеем теперь возможность определить интересующие нас параметры магнетрона в оптимальном режиме: мощность колебаний на выходе (13), анодное напряжение (18) и коэффициент полезного действия (21):

$$P = \eta_k I_a U_{a1} = 820 \text{ квт},$$

$$U_a = 0,01 Bfld \left[1 + \left(\frac{d'}{1,5l} \right)^2 \right] = 19,3 \text{ кв},$$

$$\eta_m = \eta_k \frac{d'}{d} \frac{1}{1 + \left(\frac{d'}{1,5l} \right)^2} = 0,59.$$

В двух последних выражениях мы, естественно, приняли $n=i-0,5=1,5$.

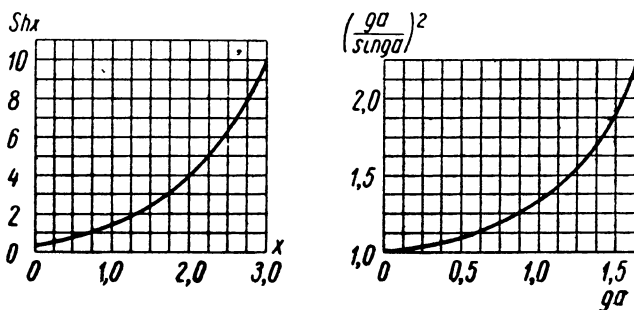
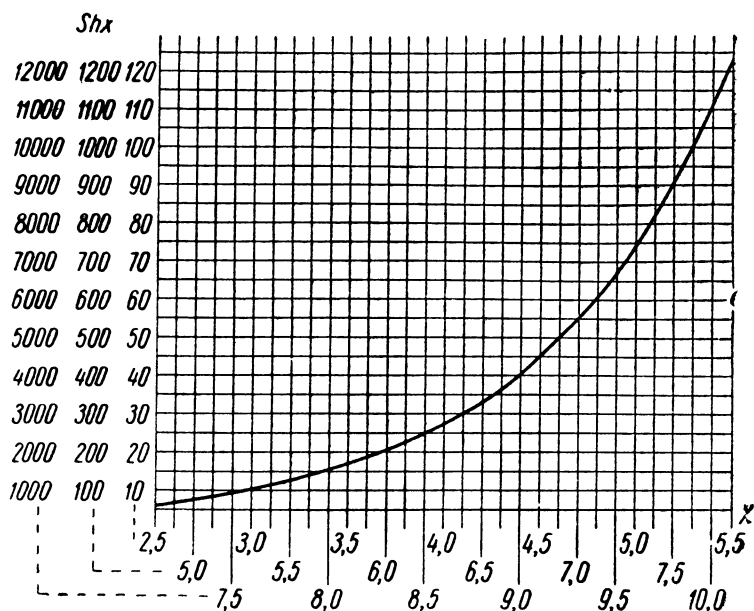


Рис. 11. Графики $shx=f(x)$ и $\frac{ga}{singa}=f(ga)$

Наконец, найдем нижнюю границу принятой нами второй зоны рабочих режимов, т. е. то значение анодного тока, до которого можно спускаться без опасности появления точки разрыва (32)

$$I_{a \text{ разр. 2}} = \overline{\left[2 + \frac{1}{2 \left(\frac{a}{b} + 1 \right)} \right]^2}^{I_{a \text{ хар.}}} = 30 \text{ а},$$

а нижняя граница третьей зоны рабочих режимов будет составлять

$$I_{a \text{ разр. } 3} = 14,7 \text{ а.}$$

Подобным образом можно рассчитать еще несколько точек разрыва, если они будут интересны для применения магнетрона.

Если по каким-либо причинам работа во второй зоне рабочих режимов окажется для данного магнетрона неприемлемой, можно выбрать другую зону и работать в ее оптимальной точке. Посмотрим, что можно получить от рассчитываемого магнетрона в оптимальной рабочей точке третьей зоны.

Оптимальное значение анодного тока для третьей зоны, для которой $i=3$, будет равно (33):

$$I_{a \text{ опт. } 3} = \frac{I_{a \text{ хар}}}{6,25} = 26 \text{ а,}$$

а соответствующие ему мощность колебаний на выходе магнетрона (13), анодное напряжение (18) и коэффициент полезного действия (21) приобретут значения:

$$P = 297 \text{ кВт,}$$

$$U_a = 16,8 \text{ кВ,}$$

$$\eta_m = 0,68.$$

Последнее, что можно рассчитать для нашего магнетрона методом, описанным в книжке, является возможное скачкообразное изменение частоты колебаний, генерируемых магнетроном в режиме, соответствующем точке разрыва. Для этого воспользуемся выражением (25) и вычислим величину частотного скачка Δf . В отличие от предыдущего частоту удобнее выражать в МГц .

$$\Delta f = 2 \frac{a}{b} \frac{\text{sh} 2gd_{rp}}{\text{sh} 2gd} \frac{\sin 2ga}{2ga} f = 20 \text{ МГц.}$$

Как видим, скачок частоты в точке разрыва может быть очень большим. Однако в многорезонаторных магнетронах скачки частоты достигают значений, близких вычисленному, крайне редко и то к концу срока службы, перед выходом из строя. Благодаря некоторой неизбежной несоосности анода и катода, неровности их поверхностей и другим причинам скачки частоты оказываются равными единицам и долям МГц ; они изменяются в течение времени и в зависимости от условий эксплуатации магнетрона.

Пример 2. Пусть нам известны геометрические размеры внутреннего устройства ЛОВ типа «М» плоской конструкции, предназначенной для работы в режиме непрерывного генерирования на той же частоте $f = 2,8 \text{ ГГц}$:

$$2a = 0,1 \text{ см; } 2b = 0,1 \text{ см; } d = 0,3 \text{ см;}$$

$$k_3 = 18; Z = 300 \text{ см}; \eta_k = 0,9.$$

Вновь требуется определить параметры прибора в оптимальном режиме.

Оптимальное значение индукции магнитного поля (48), как и в предшествовавшем примере, будет равно

$$B_{\text{опт.}} = 2000 \text{ гс},$$

электрическая длина ячейки пространства взаимодействия l_3 будет равна

$$l_3 = \frac{15}{fk_3} = 0,3 \text{ см.}$$

Вычислим поперечный размер области сортировки электронов (45)

$$d_{\text{гр.}} = \frac{114fl_3}{B} = 0,048 \text{ см},$$

поперечный размер области обмена энергией (19)

$$d' = d - d_{\text{гр.}} = 0,252 \text{ см},$$

составляющую анодного напряжения U_{a1} (43)

$$U_{a1} = 0,01 Bfl_3 d' = 4,2 \text{ кв},$$

характеристическое значение анодного тока (46)

$$I_{a \text{ хар.}} = \frac{2U_{a1}}{Z} \left(\frac{ga}{\sin ga} \right)^2 \left(\frac{\text{sh}gd}{\text{sh} \pi gd} \right)^2 \cdot 10^3 = 98 \text{ а},$$

здесь

$$\left(\frac{ga}{\sin ga} \right)^2 \left(\frac{\text{sh}gd}{\text{sh} \pi gd} \right)^2 = \left(\frac{\frac{a}{l_3} 3,14}{\sin \frac{a}{l_3} 180^\circ} \right)^2 \left(\frac{\text{sh} \frac{d}{l_3} 3,14}{\text{sh} 0,8 \frac{d}{l_3} 3,14} \right)^2 = 3,5.$$

При выборе рабочего значения анодного тока ЛОВ должны быть учтены такие факторы, как допустимая мощность, рассеиваемая на сегментах анодной замедляющей системы, эмиссионная способность катода. Положим, что повышение анодного тока $J_{a \text{ раб}}$ свыше 0,4 а является нежелательным. Тогда минимальное для данной лампы число n может быть найдено из выражения:

$$n_{\text{мин.}} = \sqrt{\frac{I_{a \text{ хар.}}}{I_{a \text{ раб. макс.}}}} \cdot \frac{l}{l_3} = 10,4.$$

Значит, желаемый рабочий режим ЛОВ может выбираться на 11—12 зонах рабочих режимов. При расчете мы приняли во внимание, что $l = 2a + 2b$.

Вычислим для рассматриваемой области несколько точек разрыва (41):

$$I_{a \text{ разр. } 10} = 0,42 \text{ а}, I_{a \text{ разр. } 11} = 0,34 \text{ а},$$

$$I_{a \text{ разр. } 12} = 0,29 \text{ а}.$$

Оптимальные значения анодного тока для 11 и 12 зон рабочих режимов соответственно определяются (42):

$$I_{a \text{ опт. } 11} = 0,39 \text{ а}, I_{a \text{ опт. } 12} = 0,33 \text{ а}.$$

Мощность колебаний на выходе ЛОВ (13), анодное напряжение (18) и коэффициент полезного действия (21) для оптимальной рабочей точки 11 зоны будут равны:

$$P = \eta_k I_a U_a^1 = 1,47 \text{ кВт},$$

$$U_a = 0,01 B f l_3 d \left[1 + \left(\frac{d'}{10,5 l_3} \right)^2 \right] \approx 0,01 B f l_3 d = 5,05 \text{ кВ},$$

$$\eta_m = \eta_k \frac{d'}{d} \frac{1}{1 + \left(\frac{d'}{10,5 l_3} \right)^2} \approx \eta_k \frac{d'}{d} = 0,75.$$

Для оптимальной точки 12 зоны рабочих режимов U_a и η_m будут иметь приблизительно те же значения, что в предыдущем случае, а отдаваемая мощность будет равна

$$P = 1,25 \text{ кВт}.$$

Величину частотного скачка Δf в точке разрыва (25) по-прежнему будем выражать в МГц

$$\Delta f = 2 \cdot \frac{a}{b} \frac{\operatorname{sh} \frac{2d_{rp}}{l_3} \pi}{\operatorname{sh} \frac{2d}{l_3} \pi} \cdot \frac{\sin \frac{2a}{l_3} \pi}{\frac{2a}{l_3} \pi} \cdot f = 21 \text{ МГц}.$$

Вычисленное значение Δf , как и в предыдущем примере, является максимально возможным. Практически скачок частоты у ЛОВ типа «М» в большинстве случаев составляет 1—5 МГц.

Линейка или машина? Описанный выше метод расчета магнетрона является наиболее простым из известных методов. При пользовании им требуется логарифмическая линейка и какое-либо средство для нахождения значений $\operatorname{sh} x$. Погрешность расчета отдаваемой магнетроном мощности, как правило, не превышает $\pm 20\%$, а анодного напряжения и коэффициента полезного действия $\pm 35\%$. Причем для анодного напряжения обычно получаются заниженные, а для коэффициента полезного действия завышенные значения. Объясняется это тем, что при расчете анодного напряжения мы учитывали только потери на аноде и пренебрегли всеми прочими потерями, имеющими место в реальном генерирующем магнетроне. Расчет скачка частоты Δf является чисто качественным, дающим лишь представление о возможных значениях этого

параметра при определенных наихудших условиях. Расчет границ зон рабочих режимов, т. е. расчет значений тока разрыва, производится с ошибкой, которая в большинстве практических случаев не превышает $\pm 20\%$. Конечно, при этом должна быть уверенность в правильности выбора значения Z , без чего расчет зон рабочих режимов в значительной степени теряет смысл.

Метод может быть использован для расчета режима работы и оптимальных точек существующего магнетрона и в равной степени для расчета конструктивных параметров и режима работы проектируемого магнетрона. В последнем случае расчет потребует повторить несколько раз, пока не будет найдено подходящее конструктивное решение. При некотором навыке один полный цикл расчета занимает не более 10—15 минут. Несколько последовательных циклов расчета могут длиться в пределах до 1 часа.

Простой расчет, основанный на некоторых очевидных физических представлениях, может дать пищу рассуждениям об основах и возможных упрощениях в теории моделирования, которой до сих пор отводится важное место в проектировании магнетронов.

Однако простой расчет, конечно, не может заменить строгой теории магнетрона, над созданием которой трудятся многие ученые в нашей стране и за рубежом. В век бурного развития вычислительной техники нет ничего неожиданного в том, что главные усилия исследователей с помощью счетных машин направляются на поиски фундаментальных закономерностей, лежащих в основе действия магнетрона. Но это не просто. Пока для расчета одного варианта магнетрона требуется несколько суток непрерывной работы самой быстрой действующей ЭВМ. Здесь явно ощущается недостаток в плодотворных идеях, реализация которых позволила бы упростить расчет, довести продолжительность одного цикла расчета до нескольких минут и начать новый этап в штурме «секретов» магнетрона.

Таким образом, на вопрос, логарифмическая линейка или счетная машина, можно ответить так: требуется и то и другое. Каждое по-своему важно и необходимо. Надо только оба эти инструмента приблизить друг к другу, заставить их действовать согласованно. И тогда успех в создании теории магнетрона безусловно будет обеспечен.

предел мощности магнетрона

При создании любого генератора естественным является желание получить возможно большую мощность. В последние годы стремление к увеличению мощности сочетается с тенденцией к снижению веса и габаритов генераторов. До каких пределов можно наращивать мощность магнетрона, одновременно заботясь о современности его конструкции? Попробуем ответить на этот вопрос, опираясь на результаты, полученные в предыдущих разделах. Для решения поставленной задачи требуется обеспечить необходимую электрическую прочность магнетрона, приемлемый тепловой режим работы электродов, а также эффективность их действия, обеспечить высокую удельную мощность прибора.

Введем некоторые коэффициенты; коэффициент связи $k_{св}$, определяющий степень связи потока электронов, движущихся в пространстве взаимодействия магнетрона, с полем его колебательной системы, представим выражением

$$k_{св} = \frac{ga}{\sin ga} \frac{\text{sh}gd}{\text{ch}gd}. \quad (49)$$

Коэффициент k_m — определяющий соотношение между циклотронной частотой $\Omega = \frac{e}{m} \beta$ и частотой колебаний $\omega = 2\pi f$, генерируемых магнетроном, представим соотношением

$$k_m = \frac{\Omega}{\omega} = \frac{e}{m} \frac{B}{2\pi f}, \quad (50)$$

коэффициент формы активной части ячейки пространства взаимодействия k_ϕ , определяющий соотношение между поперечным размером области обмена пространства взаимодействия d' и протяженностью ячейки пространства взаимодействия l (или l_s), представим соотношением

$$k_\phi = \frac{d'}{l}. \quad (51)$$

Кроме того вспомним введенное ранее выражение для коэффициента замедления k_3 (4):

$$k_3 = \frac{c}{V_x} = \frac{c}{2fl}. \quad (52)$$

С использованием этих коэффициентов выражение (14), определяющее величину той части анодного напряжения, падающего на магнетроне, которая показывает энергию, пол-

ностью преобразуемую магнетроном в колебания, U_{a1} , запишем в виде:

$$U_{a1} = \frac{\pi c^2 m}{2e} \frac{k_m k'_\phi}{k_s^2} . \quad (53)$$

Выражение (27), определяющее амплитуду переменного напряжения U_1 , действующего на щелях между сегментами колебательной системы магнетрона, запишем в виде:

$$U_1 = \frac{\pi c^2 m}{e} \frac{k_m k_{св} k_\phi^1}{n k_s^2} . \quad (54)$$

Наконец, выражение (13), определяющее мощность P на выходе магнетрона, запишем в виде:

$$P = \frac{\pi^2 c^4 m^2}{2e^2} \frac{k_m^2 k_{св}^2 k_\phi^1{}^2}{n^2 k_s^4} \frac{\pi_k}{Z} . \quad (55)$$

Значения коэффициентов $k_{св}$ и k_ϕ^1 весьма ограничены по величине. Для большинства магнетронов $1,6 < k_{св} < 2,1$ и $0,7 < k'_\phi < 1,0$. Соотношение между Ω и ω , как мы отмечали выше (34), имеет некоторое оптимальное значение, которое соответствует $k_m = 2$. Величина n также имеет оптимальное значение. К тому же, например, импульсные магнетроны работают, как правило, на второй зоне рабочих режимов, и для них предпочтительно $1,4 < n < 1,6$. Коэффициент полезного действия колебательной системы магнетрона в широком диапазоне частот может иметь значения в пределах $0,5 < \eta_k < 0,99$.

Значит, существенного увеличения мощности можно достичь только путем изменения полного резонансного сопротивления колебательной системы магнетрона Z и коэффициента замедления k_s . Других путей, как видим, не существует. Мощность колебаний на выходе магнетрона растет с уменьшением как Z , так и $k_{св}$, причем последнее играет существенно более важную роль при этом.

Попытаемся установить некоторые пределы повышения мощности магнетрона. Рассмотрение проведем на конкретных примерах, опираясь на магнетроны, описанные в книге [4]. Эти магнетроны, естественно, в какой-то части устарели, но, в отличие от более поздних публикаций, по ним есть достаточно полные данные, конструктивные размеры, параметры, характеристики.

Пример 3. Прежде всего остановимся на ограничениях, связанных с возникновением искрений в зазорах между сегментами колебательной системы магнетрона. Из рабочей характеристики, подобной той, которая представлена на рис. 5, будем брать наибольшие значения мощности P (верхний правый угол характеристики) и, зная для каждого из магнетронов величины сопротивления Z , КПД колебательной системы η_k и ширину щели $2a$, рассчитаем соответствующие им наи-

большие значения амплитуды напряженности переменного электрического поля в зазоре (щели) E_1 :

$$E_1 = \frac{U_{\Phi}}{2a} \frac{1}{2a} = \sqrt{\frac{2PZ}{\eta_k}}.$$

Результаты расчета сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Расчет наибольших значений E_1 .

Тип магнетрона	λ (см)	Z (ом)	$2a$ (см)	η_k	P (квт)	E_1 (кв/см)	Наличие искрений
LCW	33,5	800	0,304	0,92	2,5	7	отсутств.
CM16B	10,0	670	0,057	0,80	0,15	9	отсутств.
2J38—39	9,1	880	0,164	0,90	105	105	отсутств.
2J32	10,7	570	0,229	0,96	300	82	отсутств.
»	»	»	»	»	750	130	возможны
HP10V	10,6	600	0,340	0,93	2500	167	возникают
725A	3,2	500	0,060	0,80	70	139	возникают
4J50	3,2	650	0,084	0,70	300	235	возникают
3J31	1,25	1100	0,028	0,65	50	463	возникают

Можно видеть, что в области значений $E_1 > 100$ кв/см магнетроны приобретают склонность к искрениям, и дальнейшее повышение отдаваемой ими мощности становится невозможным.

Заметим, что процесс искрений в магнетроне чрезвычайно сложен и до сего времени до конца не изучен. Из практики работы с магнетронами известно, что искрения связаны с состоянием вакуума и чистотой поверхности электродов в магнетроне. Однако количественных соотношений здесь пока не найдено.

Перейдем к другому примеру. Здесь рассчитаем для тех же магнетронов, что и в предыдущем примере, удельные зна-

чения мощности и тока, по-прежнему наибольшие для каждого из магнетронов.

Пример 4. Удельное значение анодного тока j_1 , снимаемого с единицы поверхности катода, определим из выражения:

$$j_1 = \frac{I_a}{2\pi r_k h}$$

где I_a — по-прежнему анодный ток магнетрона (здесь мы будем использовать максимальное для каждого из магнетронов значение анодного тока),

r_k — по-прежнему радиус катода,

h — протяженность активной части поверхности катода (в расчетах она принята численно равной высоте анодного блока магнетрона, обозначаемой той же буквой).

Удельное значение анодного тока j_2 , протекающего через единицу объема пространства взаимодействия, определим так:

$$j_2 = \frac{I_a}{\pi(r_a^2 - r_k^2)h}$$

где r_a — по-прежнему радиус анода.

Удельное значение мощности $p_{\text{расс.}}$ (в данном случае речь идет не о импульсном, как всюду выше, а о среднем значении мощности), рассеиваемой в виде тепла на единице поверхности торцов анодных сегментов, обращенных в пространство взаимодействия, определим так:

$$p_{\text{расс.}} = \frac{(1 - \eta_e)P}{N2b\eta_k},$$

где η_e — электронный КПД магнетрона,

N — число сегментов анода магнетрона,

$2b$ — ширина сегмента анода,

h — высота анодного блока магнетрона.

Результаты расчета сведены в таблицу 2.

Магнетроны, представленные в таблице 2, не имеют ограничения по j_1 , так как известны магнетроны с $j_1 = 100 \text{ а/см}^2$ и даже более, и, по-видимому, не имеют ограничения по j_2 . Что касается удельной мощности рассеяния на аноде, то при $p_{\text{расс.}} > 100 \text{ вт/см}^2$ заметно снижается долговечность и надежность магнетрона, если, конечно, не принимаются меры к эффективному принудительному охлаждению сегментов анода. Предельное значение $P_{\text{расс.}}$ может быть также повышено за счет использования соответствующих материалов и покрытий при изготовлении сегментов анода магнетрона.

Т а б л и ц а 2. Расчет удельных значений тока и мощности.

Тип магнетрона	j_1 (а/см ²)	j_2 (а/см ²)	$P_{\text{расс}}$ (вт/см ²)
LCW	0,06	0,065	50
CM16B	0,18	1,1	100
2J38—39	16,0	34,7	60
2J32	8,0	8,7	25
HP10V	9,0	7,5	85
725A	35,0	180	105
4J50	30,0	180	275
3J31	62,0	570	200

использование магнетрона

Когда магнетрон рассчитан, спроектирован и изготовлен, от него требуется четкое, безотказное и длительное выполнение определенных функций в аппаратуре. Начинается новая страница в «биографии» магнетрона — использование, которое включает в себя применение и эксплуатацию. Применение должно обеспечить правильный расчет схемы, в которой предполагается использование магнетрона, выбор таких режимов и условий, в которых с наибольшей полнотой проявились бы все лучшие качества этого прибора. Эксплуатация должна обеспечить, чтобы эти выбранные режимы и условия строго выдерживались в течение всего времени работы магнетрона в аппаратуре.

В использовании — многое от искусства. Можно точно спроектированный и качественно изготовленный магнетрон вывести из строя на первых часах работы из-за неверной схемы его включения, несоблюдения порядка введения в режим и отклонений режима от заданных норм. В то же время мож-

но в определенных случаях получать желаемые параметры от работоспособного, но некондиционного магнетрона. Однако основой успешного использования магнетрона является безусловное соблюдение ряда правил, часть которых мы здесь упомянем.

При работе в аппаратуре магнетрон подвергается воздействию со стороны схемы, включающей источники питания и высокочастотные цепи, а также воздействию механических, климатических и других факторов. Источники питания должны обеспечивать необходимые номиналы токов и напряжений, быть стабильными и не иметь пульсаций, превышающих допустимые значения. При необходимости напряжения и токи должны изменяться по заданному закону. Высокочастотные цепи, подключенные к выходу, а также ко входу магнетрона, должны быть с ним согласованы. Механические воздействия должны согласовываться по величинам и спектру частот. Температура среды, окружающей магнетрон, не должна выходить за пределы, допускаемые конструкцией магнетрона. Влажность и давление воздуха также имеют существенное значение для сохранности и работоспособности магнетрона.

Одним из уязвимых органов магнетрона является катод, работа которого совершается в сложных температурных и электрических условиях. Действительно, когда магнетрон не включен, температура катода сравнивается с температурой окружающей магнетрон среды. При включении в течение короткого времени, измеряемого минутами или секундами, температура катода возрастает в зависимости от типа катода до 800, 1000, 1500°C и даже более. С поверхности катода снимаются токи с плотностью, измеряемой единицами, десятками, а в отдельных случаях и сотнями a/cm^2 . Остатки газа в лампе, а также загрязнение и неровности поверхности катода приводят к возникновению искрений и пробоев между катодом и анодом магнетрона, что неизбежно связано с повреждением и сокращением активной части поверхности катода. Для предотвращения нежелательных последствий следует строго соблюдать режим включения и тренировки магнетрона, который обычно указывается в паспорте на прибор.

Выше мы касались вопроса о выборе значений анодного тока магнетрона и возможных пределов их изменения в границах зон рабочих режимов. Здесь укажем еще на особенность импульсных магнетронов, на требования к форме их импульса. Эти требования накладываются на крутизну переднего фронта импульса напряжения, на спад амплитуды импульса в течение его длительности, на крутизну заднего фронта импульса. Если крутизна переднего фронта импульса напряжения ниже установленного предела, то снижается КПД магнетрона, искажается спектр частот генерируемых им колебаний. Если крутизна переднего фронта выше нормы,

снижается устойчивость магнетрона к искрениям и пробоям, сокращается срок его службы. Наличие значительного спада амплитуды импульса приводит к искажению формы спектра колебаний, генерируемых магнетроном, и сужению области рабочих режимов. Отклонение от норм крутизны заднего фронта связано со снижением стабильности магнетрона.

Импульсный магнетрон, питаемый от модулятора, обеспечивающего формирование импульсов с заданными параметрами, является одновременно нагрузкой по отношению к модулятору. Поэтому правильное согласование магнетрона и модулятора также является одним из условий нормального действия как магнетрона, так и аппаратуры в целом.

Важную роль в поддержании необходимой стабильности и долговечности магнетрона играет правильный выбор параметров высокочастотной цепи, подключаемой к выводу энергии магнетрона. Основой при выборе параметров высокочастотной нагрузки служит так называемая нагрузочная характеристика. Она изображается в полярных координатах. Расстояние от центра диаграммы определяет степень отражения колебаний от нагрузки, а угловое смещение вокруг центра — величину или изменение фазы отражения. Заметим, что у усилительных магнетронов изменения частоты колебаний при изменении нагрузки не происходит, изменяется только мощность колебаний.

Наиболее благоприятны для магнетрона условия работы, которые соответствуют, как правило, центру нагрузочной характеристики, т. е. случаю полного согласования магнетрона с нагрузкой. Однако на практике такие идеальные условия создать не удается. Поэтому для каждого магнетрона имеются допустимые пределы изменения отражения и фазы отражения от высокочастотной нагрузки, подключенной к магнетрону.

закключение

В космическом пространстве движутся потоки заряженных частиц, на них действуют электрические и магнитные поля, создаваемые различными источниками, в том числе другими потоками заряженных частиц. Кто может поручиться, что среди сложных физических процессов, совершающихся во Вселенной, нет магнетронного колебательного процесса?

В пространстве, окружающем нашу Землю, в том числе в атмосфере, также происходит непрерывное движение заряженных частиц, положительных и отрицательных. Движение это происходит в постоянном магнитном поле Земли, измеряемом долями гаусса. Между различными положительно и отрицательно заряженными областями пространства могут соз-

даваться постоянные и переменные электрические поля, которые в общем случае не будут совпадать по направлению с направлением магнитного поля. Может быть, магнетронные колебания играют существенную роль в околоземном пространстве?

Ученые производят исследования свойств веществ, приведенных в состояние сверхпроводимости и находящихся под действием скрещенных электрического и магнитного полей. Они изучают резонансные свойства электронов, беспрепятственно движущихся при этом по сложным петлеобразным траекториям через толщу вещества, которое для них так же пронизуемо, как вакуумный промежуток в существующем магнетроне. Разве можно утверждать, что в будущем не появится магнетрон, в котором вакуумное пространство взаимодействия не будет заменено на сверхпроводящее вещество? Много вопросов возникает в связи с рассмотрением принципа действия и возможных форм существования магнетрона.

Вглядываясь в окружающий нас мир, изучая, анализируя его, мы не должны забывать, что и старый, ныне существующий магнетрон таит в себе еще немало загадок, а главное — немало новых возможностей его практического совершенствования!

лит е р а т у р а

Бычков С. И. Вопросы теории и практического применения многорезонантных магнетронов. Л., Изд. ЛКВВИА, 1958.

Капица П. Л. Электроника больших мощностей. М., Изд-во АН СССР, 1962.

Коваленко В. Ф. Введение в электронику сверхвысоких частот, ч. II. М., «Сов. радио», 1951.

Магнетроны сантиметрового диапазона. Пер. с англ. под ред. С. А. Зусмановского. М., «Сов. радио», 1966.

Панин И. С., Панченко Л. В. Импульсные магнетроны. М., «Сов. радио», 1966.

Палатов К. И. Приборы СВЧ. М., «Знание», 1966.

Стрюков В. Б., Хлопов Ю. Н. Электроника больших мощностей. М., «Знание», 1966.

К ЧИТАТЕЛЯМ СЕРИИ «РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И СВЯЗЬ»

В январе исполнился год, как выходят в свет брошюры серии «Радиоэлектроника и связь». За это время, судя по отзывам читателей и возросшему тиражу, серия приобрела известную популярность, вызвала к себе несомненный интерес. Есть письма, свидетельствующие о том, что некоторые читатели узнают о той или иной брошюре слишком поздно, когда она уже разошлась: издательство в этом случае не может удовлетворить их спрос.

ДОРОГИЕ ТОВАРИЩИ!

Напоминаем, что в 1967 году издательство выпустит в серии «Радиоэлектроника и связь» 12 работ. Среди них:

Сифоров В. И., чл.-корр. АН СССР. Радиоэлектроника сегодня и завтра (о достижениях и основных тенденциях развития радиоэлектроники в нашей стране и за рубежом).

Лукьянович В. М., доктор хим. наук. Электронная микроскопия.

Федоров Б. Ф., канд. техн. наук. Оптический гироскоп (о гироскопе, основанном на лазере).

Кромский Г. И., Солуян С. И., канд. техн. наук. Лазерная локация и связь (о новых направлениях лазерной техники).

Кононов В. Г., канд. техн. наук. Вероятностные методы в радиотехнике и связи (о теории вероятностей и математической статистике на службе надежности работы линий связи и радиоэлектронной аппаратуры).

Курбаков К. И., канд. техн. наук. Электроника в стандартизации.

Чтобы получать брошюры регулярно, а к концу года собрать полную библиотечку, лучше всего подписаться на серию «Радиоэлектроника и связь», как подписываются на газеты и журналы. Ее индекс 70077. Подписная плата с 1 апреля до конца года — 81 коп.

Заказы на отдельные работы принимаются в книжных магазинах по тематическому плану издательства «Знание» на 1967 год. В тематическом плане названия брошюр серии «Радиоэлектроника и связь» помещены на страницах 70—73.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»