

---

# ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

---

УДК 621.385.64

## ВТОРОЕ РОЖДЕНИЕ МАГНЕТРОННОГО НАПРАВЛЕНИЯ

О. А. Морозов, М. Ф. Воскобойник, А. Н. Каргин, Г. П. Савенко

*ЗАО «НПП «Магратеп», г. Фрязино*

**Изложена история рождения магнетронов промышленного применения в НПП «Исток» и их дальнейшего развития в НПП «Магратеп». Описываются особенности конструкции и используемые технологии, приведены примеры применения магнетронов и установок на их основе в России и за рубежом.**

**The history of birth of magnetrons for industrial application in RPC “Istok” and their subsequent development in RPC “Magratep” is provided. The peculiarities of design and applied technologies are described, examples of application of magnetrons and installations based on them in Russia and abroad are given.**

### 1. ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННОСТЬ

Очередной Юбилей отмечает в 2008 году славный коллектив ФГУП «НПП «Исток» – на этот раз 65 лет!

В багаже коллектива – многие типы электровакуумных (ЭВП) и твердотельных приборов для десятков систем, их использующих.

Авторы участвовали в создании различных видов магнетронов. Магнетрон – один из старейших СВЧ-приборов, появившихся еще на заре СВЧ-техники. Это направление зарождалось вместе с «Истком» в 40-е годы XX века, когда в НИИ-160 велись интенсивные разработки магнетронов для радиолокационной техники. С тех пор разработаны сотни типов ЭВП (не только магнетронов!) для военного, промышленного и медицинского применения, которые продемонстрировали способность «Истока» отвечать требованиям времени. Усилиями многих выдающихся ученых, конструкторов и технологов (Коваленко В. Ф., Зусмановский С. А., Федосеев А. П., Гельвич Э. А., Некрасов Л. Г., Соколов И. В., Зиангиров Т. В., Ковалев Ю. А., Батыгин В. Н., Котюргин Е. А., Дюбуа Б. Ч. и др.) решены задачи ПВО страны, а также создан тот научно-технический задел, который позволяет и сегодня предлагать высокотехнологичные изделия на внутреннем и мировом рынках.

Затем направление магнетронов претерпело кризис: появившиеся цепочки (маломощный высокостабильный генератор + мощный усилительный клистрон) обеспечивали более высокие параметры РЛС. К счастью, к этому времени сверхвысокочастотные колебания стали ис-

пользоваться для нагрева различных диэлектрических материалов и появилась потребность в «промышленных» магнетронах, поскольку они могут обеспечить очень высокий КПД – важнейший параметр промышленной СВЧ-установки. Под руководством И. В. Соколова и Б. Г. Машина был разработан ряд мощных магнетронов непрерывного действия в диапазонах 433 МГц (50 кВт), 915 МГц (50 кВт), 2450 МГц (5 кВт) [2].

Дальнейшее развитие промышленные магнетроны получили в НПП «Магратеп» – малом дочернем предприятии ФГУП «НПП «Исток», созданном в 1991 году. Проводились научные разработки, совершенствовались конструкция и технология, и к концу XX века магнетроны «Магратепа» достигли очень высоких параметров [3].

Например, ЗАО «НПП «Магратеп» выпускает самый мощный промышленный магнетрон М116-100 с выходной непрерывной мощностью 100 кВт и КПД не менее 85 % (рис. 1).



Рис.1. Промышленный магнетрон М116-100:  
выходная мощность – 100 кВт, рабочая частота – 915 МГц



Чем характерно развитие магнетронного направления в «Магратепе» за последнее 5-летие?

Во-первых, получило дальнейшее развитие и укрепилось направление разработки СВЧ-установок для научного и промышленного применения:

- в г. Черноголовку отгружены три СВЧ-генератора на частоту 2450 МГц с выходной мощностью 5 кВт, предназначенных для получения мелкодисперсных сверхчистых порошков металлов;
- разработан и введен в действие в г. Алма-Ате (Казахстан) генератор (50 кВт/915 МГц) для нагрева мазута с производительностью 1800 л/ч;
- в г. Зернограде (Россия, Ростовская обл.) работает СВЧ-установка (5 кВт/2450 МГц) для термической обработки фуражного зерна, обеспечивающая повышение его пищевой ценности (рис. 2);

Рис. 2. Установка «Магра-Э»  
для СВЧ-обработки зерновых

- разработана и поставлена РАН уникальная СВЧ-установка для предыонизации плазмы в рабочей камере «Токамака»; её особенность – длительность импульсов 1...5 с при частоте повторения 4 имп./ч, причем реализован режим модуляции по магнитному полю;
- в г. Бийске (Россия) работает СВЧ-установка полимеризации стержней из стеклопластика (5 кВт/2450 МГц);
- разработана и поставлена Российскому университету дружбы народов многофункциональная СВЧ-установка на магнетроне с рабочей частотой 2450 МГц; установка способна работать в непрерывном режиме с регулировкой мощности от 800 до 5000 Вт, а также в импульсном режиме с такой же мощностью при длительности импульсов от 50 до 1000 мкс;
- подготовлены к отправке в г. Харьков (Украина) два генератора (5 кВт/2450 МГц и 50 кВт/915 МГц) для поджига экспериментальных угольно-воздушных горелок.

Во-вторых, за пятилетие нарастал интерес к СВЧ-установкам со стороны Министерства обороны России. Их отличительная особенность – импульсный режим работы с широким диапазоном длительности (0,5...1000 мкс) и значительной импульсной СВЧ-мощностью (до 10...15 МВт). Установки используются для исследования различных аспектов применения СВЧ-энергии, включая использование микроволн для поиска и обезвреживания мин, взрывных устройств и т.п. [4] (рис. 3).



Рис. 3. Анодный блок и вывод энергии мощного импульсного магнетрона

Это ставит перед коллективом НПП «Магратеп» новые и серьезные задачи по разработке катодных узлов, выводов энергии (предотвращение вторично-электронного разряда и др.), а также обеспечению работоспособности приборов при большой длительности импульсов.

К настоящему времени разработано и поставлено заказчику несколько СВЧ-установок в рамках НИР и заканчивается ОКР по мощной установке дециметрового диапазона.

Таким образом, сегодня «Магратеп» – это:

- технология магнетронов непрерывного действия и генераторных установок на их основе для народнохозяйственного применения;

- реставрация мощных ЭВП;
- новые сверхмощные импульсные магнетроны оборонного назначения;
- различные научно-технические услуги;
- компьютерное электромагнитное моделирование СВЧ-узлов и магнитных систем;
- 3D-конструирование и компьютерная разработка КД;
- современные технологии изготовления и сборки приборов, включая программную электроискровую и токарную обработки, лазерную сварку и пайку металлокерамических узлов.

## 2. КОРОТКО О МАГНЕТРОНАХ

### *Принцип действия*

Магнетрон – прибор, преобразующий мощность постоянного или импульсного тока в мощность СВЧ-колебаний. Основные элементы магнетрона: резонаторы, свернутые в кольцевую анодную структуру, термокатод и магнитная система, создающая постоянное магнитное поле вдоль оси прибора.

Электроны, испускаемые катодом в промежуток между анодом и катодом, дрейфуют под действием скрещенных статических полей вокруг катода. СВЧ-мощность генерируется в результате синхронного взаимодействия электронов с анодной резонаторной структурой, когда приложенное напряжение достигает определенного (порогового) значения. КПД такого резонансного взаимодействия может достигать высоких значений (80...90 %).

### *Анодная технология*

В магнетронах используются различные типы анодов. Каждый тип имеет собственные преимущества, которые делают его наиболее подходящим для конкретного применения. Анодные технологии, используемые в наших магнетронах:

- ламели со связками;
- длинный анод;
- «восходящее солнце».

Анодная резонаторная система разрабатывается таким образом, чтобы обеспечить возбуждение колебаний исключительно рабочего  $\pi$ -вида. Наилучший тип анода для конкретного применения определяется следующими факторами:

- обеспечение выходной мощности;
- отвод тепла от ламелей;
- площадь катодной поверхности (следовательно, долговечность);
- технологичность.

Анод со связками имеет хороший КПД, превосходное разделение мод и низкую цену. Длинный анод позволяет получить сверхбольшую мощность. Анод «восходящее солнце» особенно подходит для магнетронов более коротковолнового диапазона (свыше 5 ГГц) и имеет хорошие возможности для работы в импульсном режиме.

Поиск большей воспроизводимости и точности привел нас к использованию таких методов производства, как механическая обработка на станках с ЧПУ, выдавливание и электроискровая обработка. Электроискровой метод дает возможность производить сложные формы автоматически, с микронной точностью (рис. 4).



Рис. 4. Резонатор мощного импульсного магнетрона, изготовленный электроискровым способом

### ***Катодная технология***

Эксплуатационная долговечность правильно спроектированного и должным образом используемого магнетрона в конечном счете зависит от катода (рис. 5).



Рис. 5. Современные катоды магнетронов

В НПП «Магратеп» используют целый ряд катодных технологий, чтобы достичь оптимальных параметров прибора и долговечности в каждом применении. Они включают:

- оксидные опрессованные катоды с никелевой губкой для мощных импульсных приборов военного назначения (до 10...15 МВт в импульсе);
- прямонакальные вольфрамовые катоды для мощных магнетронов промышленного нагрева (5...100 кВт);
- квазипрямонакальные катоды с вольфрамовой губкой, пропитанной алюминатом бария, для промышленных магнетронов средней мощности (до 5 кВт);
- прямонакальные экономичные катоды из вольфрама, покрытого сплавом IrLa, с малым временем готовности (до 5 кВт).

### **Технология магнитных систем**

Приложенное магнитное поле определяет рабочее напряжение магнетрона и его КПД.

В магнетронах большой мощности магнитное поле создается с помощью соленоидов с водяным охлаждением, обеспечивающих однородное магнитное поле в пространстве взаимодействия длинноанодных приборов. В некоторых применениях ток соленоида можно регулировать, чтобы управлять выходной мощностью магнетрона.

Как правило, в магнетронах используются полюсные наконечники из чистого железа, чтобы создать магнитное поле требуемой формы.

Магнитные AlNiCo-материалы применяют там, где требуется точная установка рабочего напряжения и хорошая температурная стабильность поля.

В пакетированных магнетронах используются самарий-кобальтовые, железо-неодим-бор и ферритовые магниты. Преимущества магнитов из  $\text{SmCo}_5$  перед другими сплавами:

- существенное уменьшение габаритов и массы;
- стойкость к случайному размагничиванию из-за стороннего ферромагнитного материала, поднесенного слишком близко;
- более высокое магнитное поле. Это особенно важно для высокочастотных магнетронов.

### **3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Если не акцентировать внимание на таких общих бедах, как трудности подбора кадров, устаревшее оборудование и некачественные материалы, то магнетронное направление живет и имеет хорошие перспективы, если их верно оценивать и использовать. Тем более что весь цивилизованный мир, включая «любимый» нами Запад, широко использует СВЧ-нагрев и сушку. На микроволновых технологиях работают большие предприятия и целые отрасли, и это внушает надежды.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Кандыбей В.Г., Каргин А.Н. Лаборатория магнетронных генераторов № 7 и её развитие // Люди, дела, достижения: сб. к 40-летию НПК-2 ФГУП «НПП «Исток»; под ред. Э. А. Гельвича. – Фрязино: типография ФГУП «НПП «Циклон-Тест», 2002.

2. *Воскобойник М.Ф., Машин Б.Г.* Лаборатория № 9 и её развитие («Магратеп») // Люди, дела, достижения: сб. к 40-летию НПК-2 ФГУП «НПП «Исток»; под ред. Э. А. Гельвича. – Фрязино: Типография ФГУП «НПП «Циклон-Тест».

3. *Морозов О.А., Соколов И.В.* Современное состояние и тенденции развития магнетронов для СВЧ-нагрева в промышленности и медицине // Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника. – 2000. – Вып. 2(476). – С. 3-9.

4. Возможности применения СВЧ-энергии для поиска противопехотных мин / *М.Ф. Воскобойник, А.Б. Киселев, О.А. Морозов, И.В. Соколов* // Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника. – 2000. – Вып. 2(476). – С. 57-59.

Статья поступила 21 мая 2008 г.

---

### === НОВЫЕ КНИГИ ===

СУКЕР К. **Силовая электроника.** Руководство разработчика. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2008. – 252 с., ил.

Для специалистов в области электронной техники термин «силовая электроника» ассоциируется в первую очередь с источниками питания, схемами управления различными исполнительными механизмами с мощностью, не превышающей нескольких киловатт. В этой книге рассмотрены особенности оборудования с мощностями, измеряемыми в МЕГАВАТТАХ! Эта книга по сути краткая энциклопедия современной силовой электроники.

В первых главах книги приведен интереснейший исторический обзор развития электротехники, описаны основные компоненты электрических систем. Далее рассмотрены некоторые методы расчетов, основы теории управления системами с обратной связью, переходные процессы в электрических цепях. Большое внимание уделено трансформаторам и электрическим машинам – от принципов работы до особенностей конструкций и систем охлаждения. Весьма подробно описаны выпрямители (в том числе многофазные), IGBT, тиристоры и схемы их применения, рассмотрены вопросы параллельного и последовательного включения тиристоров. В отдельных главах рассмотрены особенности импульсных режимов работы трансформаторов и тиристоров, вопросы, связанные с возбуждением гармоник в сетях электропитания и коэффициентом мощности, а также с процессами передачи тепла и охлаждения полупроводниковых приборов. Последняя глава касается применения силовой электроники. В ней описано множество уникальных устройств – от передатчика системы связи с подводными лодками и операционного усилителя с мощностью 600 кВт до разнообразных источников питания электродуговых печей, индукционных нагревателей и генераторов озона. В приложениях представлена разнообразная полезная информация – от нормирования параметров конденсаторов, применяемых для коррекции коэффициента мощности, до свойств водных растворов гликоля.

Эта книга будет полезна инженерам и техникам, разработчикам и конструкторам, работающим в сфере силовой электроники, а также студентам, изучающим различные аспекты силовой электроники.