

МАГНЕТРОН С ВОЗДУШНЫМ ПРИНУДИТЕЛЬНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ С РАДИАТОРОМ ВНУТРИ МАГНИТОПРОВОДА

MAGNETRON WITH FORCED AIR COOLING HEATSINK INSIDE THE MAGNETIC CIRCUIT

1) **Скрипкин Николай Игоревич**
нач. лаборатории
E-mail: n.skripkin@pluton.msk.ru

1) **Шмелев Антон Викторович**
ст. инженер

2) **Моругин Станислав Львович**
д-р техн. наук, зав. кафедрой
E-mail: smorugin@yandex.ru

1) ПАО "Плутон", г. Москва

2) **Институт радиоэлектроники и информационных технологий Нижегородского государственного технического университета имени Р. Е. Алексева, Нижний Новгород**

Аннотация: Представлены результаты теоретического анализа магнетрона с воздушным охлаждением, в конструкции которого радиатор расположен внутри магнитопровода. Показаны преимущества такой конструкции в сравнении с расположением радиатора вне магнитопровода (более низкая температура при той же мощности теплоотдачи, меньшие габариты). Проведено сравнение рассчитанных значений температуры нагрева магнетрона с экспериментальными данными, показавшее их хорошую сходимость.

Ключевые слова: магнетрон, принудительное охлаждение, теплоотвод, датчик температуры.

1) **Skripkin Nicholas I.**
Head of Laboratory

E-mail: n.skripkin@pluton.msk.ru

1) **Shmelev Anton V.**
senior engineer

2) **Morugin Stanislav L.**
D. Sc. (Tech.), Head of the Department
E-mail: smorugin@yandex.ru

1) **Public Company "Pluton", Moscow**

2) **Institute of Radio Electronics and Information Technologies of Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseyev, Nizhny Novgorod**

Abstract: The results of theoretical analysis magnetron with air cooling in which the radiator is disposed within the magnetic circuit. The advantages of this construction, compared with the external radiator — lower temperatures for the same heat capacity, smaller size. Comparison of the calculated values of the heating temperature of the magnetron with experimental data revealed their good convergence.

Keywords: magnetron, forced cooling, heat sink, temperature sensor.

ВВЕДЕНИЕ

Магнетроны коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн в силу своих физических особенностей обладают низким КПД [1]. Для возбуждения колебаний в таких магнетронах и получения необходимой импульсной мощности необходимо работать при высоких значениях напряжения и тока анода. Средняя мощность, передаваемая на анод электронным потоком, может составлять в интервале генерации несколько сотен ватт. Перегрев корпуса анодного блока в генераторном режиме недопустим, поскольку резко уменьшается время безотказной работы магнетрона. Проблема отвода и рассеивания тепла может быть решена за счет принудительного жидкостного охлаждения. Однако применяемые в настоящее время системы жидкостного охлаждения громоздки, энергоемки, неудобны в эксплуатации.

В статье [2] рассмотрен эффективный способ передачи тепла от источника нагрева с помощью теплопроводящих стержней на периферию к радиатору с последующим охлаждением его воздушным потоком.

Предлагается другой не менее эффективный способ охлаждения анодного блока, когда ребра охлаждения выполнены как единое целое с анодом и помещены внутрь внешнего магнитопровода, в который подается поток воздуха. Такой конструктивный вариант возможен, так как с увеличением частоты генерации магнетрона требуется существенное увеличение магнитной индукции в пространстве взаимодействия и приходится использовать магнитные системы достаточно больших размеров с радиальным намагничиванием, по существу и определяющих габариты магнетрона. Тогда пространство внутри внешнего магнито-

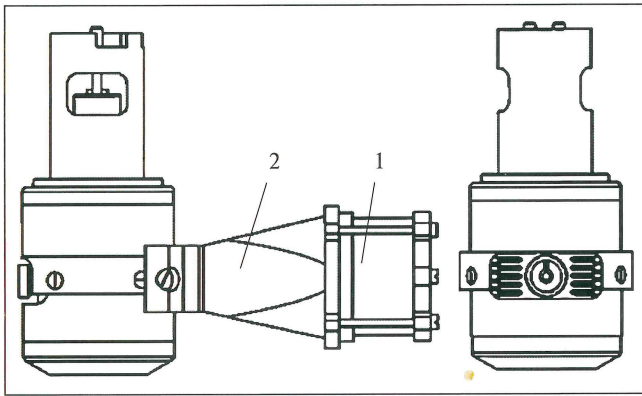


Рис. 1. Конструкция магнетрона с радиатором охлаждения внутри магнитопровода:

1 — вентилятор; 2 — воздуховод

провода, имеющего форму пустотелого цилиндра, может быть заполнено ребрами охлаждения анодного блока.

В данной статье проводится расчетная и экспериментальная сравнительная оценка конструкции магнетронов с магнитопроводом, находящимся снаружи радиатора, выполненного как одно целое с анодным блоком, с конструкцией магнетрона, представленной в [2]. Сравниваются два способа реализации принудительного охлаждения магнетрона воздушным потоком. Первый способ — обдув радиатора, находящегося снаружи магнитопровода при передаче тепла по медным стержням от анода к радиатору [2], и второй способ — обдув радиатора, расположенного внутри магнитопровода, представленный на рис. 1.

МЕТОДИКА СРАВНЕНИЯ

Сравнение двух вариантов конструкции проводилось по следующей методике. Задается требуемая предельная температура анода магнетрона. Эта температура должна обеспечиваться за счет изменения интенсивности обдува радиаторов. Считаем, что тепловое сопротивление на пути от анода к радиаторам достаточно мало в обоих случаях, чтобы можно было обеспечить нужную температуру путем их обдува. Будем считать, что за счет принудительного обдува температура анода внутри корпуса (во внутренней контрольной точке около анода, где установлен датчик температуры) одинакова для обеих конструкций.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

На рис. 2 приведены результаты расчета по трехмерной модели магнетрона по специально

разработанной программе, учитывающей теплопередачу, конвекцию и излучение. Магнетрон рассеивает в среднем 225 Вт. Видно, что температура внутренней части анода в обоих случаях одинакова, но температура на кончиках ребер радиатора для случая внутреннего радиатора заметно выше.

Сечение расчетной модели, соответствующей конструкции на рис. 1, показано на рис. 3. В таблице приведены результаты расчетов разных вариантов исполнения внешнего и внутреннего радиаторов при следующих исходных данных (для температур указан перегрев по отношению к температуре внешней среды):

- входное сечение воздуховода для внутреннего радиатора 38×16 мм;
- выходное сечение воздуховода 46×19 мм;

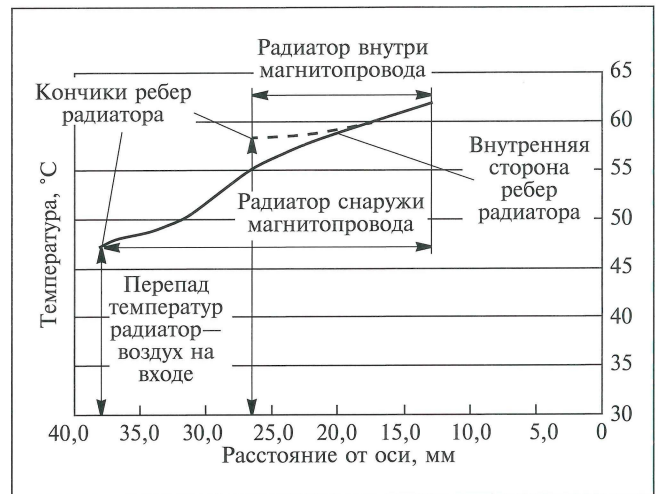


Рис. 2. Изменение температуры от кончиков ребер радиатора до центра магнетрона

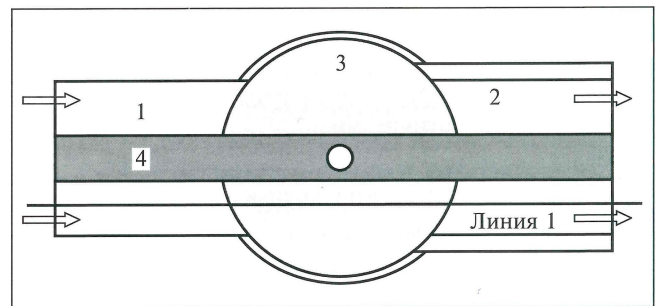


Рис. 3. Сечение расчетной тепловой модели:

1 — входной воздуховод 38×16 мм; 2 — выходной воздуховод 46×19 мм; 3 — пластины радиатора с внешним диаметром 58 мм; 4 — медная перегородка: стрелками показано направление движения воздуха

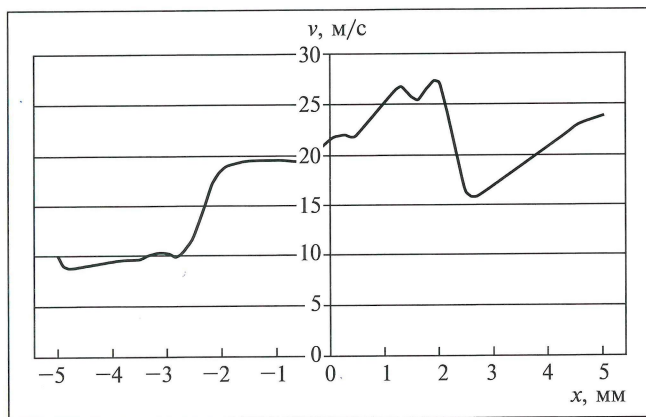


Рис. 4. Скорость воздушного потока вдоль радиатора

— избыточное давление на входе 980 или 3000 Па (при разной мощности вентилятора);

— температура окружающей среды и воздуха на входе +30 °С;

— диаметр стержней в конструкции с внешним радиатором 10,2 мм, число стержней 5 шт.

Из расчетов, приведенных в таблице, следует, что

— перепад температуры на стержнях конструкции с внешним радиатором составляет 14,8 °С, и он не может быть уменьшен за счет увеличения интенсивности обдува;

— перепад температур между медным анодом на окружности радиуса $R = 3$ мм и кончиками ламелей составляет 34,2 °С, перепад практически одинаков для обеих конструкций.

Перепад температур на ребрах внешнего радиатора невелик (1 °С), что свидетельствует о невысокой интенсивности отбора тепла и большом за-

пасе толщины меди на ребрах. Основной перепад температуры наблюдается на стержнях, и он не может быть уменьшен в силу конструктивных ограничений на максимальный диаметр стержней. Даже материал медного анода на расстоянии от ламелей до магнитопровода вносит тепловое сопротивление.

С внешнего радиатора интенсивность снятия тепла невелика, а увеличить отбор тепла с внешнего радиатора нельзя, поскольку его температура уже приближается к температуре входящего воздуха. Внутренний же радиатор находится при более высокой температуре, что позволяет снять ту же мощность при меньшей площади радиатора.

На рис. 4 показано распределение скорости v воздушного потока по линии 1 (см. рис. 3), слева — вход, справа — выход потока. Скорость потока увеличивается в области между ребрами радиатора и далее падает при выходе потока в выходное отверстие большего сечения, чем входное.

Толщину ребер радиатора нецелесообразно делать меньше 1...0,75 мм, поскольку при меньшей толщине ребер и зазоров между ними возрастает аэродинамическое сопротивление воздушному потоку, а температура на кончиках ребер приближается к температуре обдуваемого воздуха, т. е. тонкие ребра недостаточно эффективно перераспределяют поток тепла от центра (анода) на края.

Температура воздуха, продуваемого вдоль ребер, возрастает от температуры входного потока до выходной (рис. 5). На рис. 5 показана температура перегрева относительно температуры окружающей среды и температуры входного потока

Сравнение вариантов выполнения радиатора в магнетроне

| Параметр | Внешний радиатор | Внутренний радиатор, номер варианта | | | | |
|--|------------------|-------------------------------------|------|-------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Толщина ребер радиатора, мм | 2 | 1 | 0,5 | 1 | 2 | 0,5 |
| Давление на входе, Па | 460 | 3000 | 3000 | 980 | 980 | 980 |
| Температура при $R = 1,5$ мм (кончики ламелей) | +98,7 | +64,2 | +58 | +77,2 | +83 | +70,8 |
| Температура анода при $R = 3$ мм | +64,5 | +29 | +24 | +43 | +49 | +36,8 |
| Температура на внутренней стороне стержней | +38,8 | — | — | — | — | — |
| Температура на кончиках ребер радиатора | +23,5 | +22,5 | +17 | +35,5 | +38,7 | +29,7 |
| Температура на основаниях ребер радиатора/стержней | +24 | +29 | +24 | +43 | +41,8 | +36,8 |
| Скорость потока воздуха, м/с | 10 | 28 | 39 | 18,5 | 22 | 23 |
| Объем потока, м ³ /ч | 86 | 61,3 | 85,3 | 40,41 | 48,2 | 50,3 |
| Мощность потока воздуха, Вт | 11 | 51 | 71,2 | 11 | 13,10 | 13,7 |

но, чем перенос тепла за счет теплопроводности сплошной меди, и тем более за счет теплопроводности магнитопровода.

При конструировании радиатора требуется учитывать аэродинамическое сопротивление для потока воздуха, проходящего через охлаждающую систему магнетрона, и минимизировать его для уменьшения мощности обдува.

При высокой интенсивности обдува охладить внутренний радиатор в рабочем режиме можно до температуры ниже окружающей среды, однако это требует мощности компрессора, превышающей мощность, выделяемую на магнетроне.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Скрипкин Н. И.* Магнетроны 2- и 3-мм диапазонов. Новые разработки и перспективы их использования // *Электроника*. — 2013. — Вып. 3. [*Skripkin, N. I.* Magnetrons 2 and 3 mm range. New developments and prospects of their use // *Electronics*. — 2013. — Vol. 3. (In Russian)]
2. *Моругин С. Л., Скрипкин Н. И., Шмелев А. В.* Магнетрон с воздушным принудительным охлаждением // *Датчики и системы*. — 2015. — № 4 (191). — С. 18—22. [*Morugin, S. L., Skripkin N. I., Shmelev A. V.* Magnetron with forced air cooling // *Sensors and Systems*. — 2015. — N 4 (191). — P. 18—22. (In Russian)]
3. *Караджи В. Г., Московко Ю. Г.* О высоком КПД вентиляторов и эффективности вентиляционных систем // *АВОК*. — 2014. — № 6. [*Karadzhi, V. G., Moskovko Yu. G.* About High Performance Factor of Fans and Efficiency of Ventilation Systems // *ABOK*. — 2014. — N 6. (In Russian)]