

DOI: 10.17725/rensit.2021.13.297

## Циклотронные защитные устройства СВЧ-диапазона для приемников РЛС

Быковский С.В.

НПП «Исток» им. А.И. Шокина, <http://www.istokmw.ru/>  
Фрязино 141190, Московская обл., Российская Федерация

E-mail: [serbyko@mail.ru](mailto:serbyko@mail.ru)

Поступила 05.04.2021, рецензирована 19.04.2021, принята 26.04.2021

**Аннотация:** Приведен краткий обзор последних разработок циклотронных защитных устройств СВЧ-диапазона, особенностей их функционирования и параметров. Отмечается, что данные устройства имеют ряд важных преимуществ перед другими типами защитных устройств: являются автономными, обеспечивают отсутствие пика просачивающейся на выход СВЧ мощности, частотную фильтрацию и низкий коэффициент шума (0.7-1.2 дБ). Верхняя граница линейности циклотронных защитных устройств в режиме пропускания сигнала при компрессии коэффициента передачи на 1 дБ составляет ~ 1 мВт. Устройства способны работать с входной импульсной мощностью до 10 кВт и более, при этом ослабление входной мощности в режиме защиты составляет более 60-80 дБ. Время восстановления параметров после окончания мощного входного импульса – 10-20 нс. Для устройств 3-см диапазона длин волн приведены экспериментальные данные по времени восстановления, верхней границе линейности, ослаблению входной мощности в режиме защиты, фильтрационным характеристикам.

**Ключевые слова:** циклотронное защитное устройство, ленточный электронный луч, быстрая циклотронная волна, пик просачивающейся мощности, время восстановления параметров, коэффициент шума

УДК: 621.385.69

*Для цитирования:* Быковский С.В. Циклотронные защитные устройства СВЧ-диапазона для приемников РЛС. РЭНСИТ, 2021, 13(3):297-302. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.297.

## Microwave cyclotron protective devices for radar receivers

Sergey V. Bykovskiy

RPC "Istok" named after Shokin", <http://www.istokmw.ru/>  
Fryazino 141190, Moscow region, Russian Federation

E-mail: [serbyko@mail.ru](mailto:serbyko@mail.ru)

Received April 05, 2021, peer-reviewed April 19, 2021, accepted April 26, 2021

**Abstract:** Brief overview of the latest developments of microwave cyclotron protective devices, their functioning and parameters is given. It is noted that these devices have a number of important advantages over other types of protective devices: they are autonomous, provide no peak of microwave power leaking to the output, frequency filtering and low noise figure (0.7-1.2 dB). The upper limit of the linearity of cyclotron protective devices in the signal transmission mode when the transmission coefficient is compressed by 1 dB is ~ 1 mW. The devices can operate with an input pulse power of up to 10 kW or more, while the attenuation of the input power in the protection mode is more than 60-80 dB. The recovery time of parameters after the end of a powerful input pulse is 10-20 ns. For devices of the 3-cm wavelength range, experimental data are given on the recovery time, the upper limit of linearity, attenuation of the input power in the protection mode, and filtration characteristics.

**Keywords:** cyclotron protection device, tape electron beam, fast cyclotron wave, peak leakage power, recovery time, noise figure

## UDC 621.385.69

For citation: Sergey V. Bykovskiy. Microwave cyclotron protective devices for radar receivers. *RENSIT*, 2021, 13(3):297-302. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.297.

## СОДЕРЖАНИЕ

## 1. ВВЕДЕНИЕ (298)

## 2. КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ (298)

## 3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ (300)

## 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (302)

## ЛИТЕРАТУРА (302)

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Параметры современных радиолокационных систем (РАС) в значительной степени определяются особенностями построения и характеристиками антенных устройств и устройств формирования излучаемых сигналов, их элементной базой [1]. Не меньшее значение для функционирования РАС имеет и обработка принимаемых сигналов, отраженных от цели. Весьма важная роль в этом процессе принадлежит защитному устройству (ЗУ) приемника РАС. Задача ЗУ – защитить чувствительные входные каскады приемника от воздействия мощного импульса своего передатчика (обычно до 10% мощности излучаемого импульса отражается от антенны и поступает на вход приемника), а также от целенаправленного электромагнитного воздействия посторонних средств радиоэлектронного подавления [2].

В последние 20 лет в новых российских разработках РАС СВЧ-диапазона достаточно широкое распространение получили циклотронные защитные устройства (ЦЗУ), а также циклотронно-защищенные комплексированные усилители (ЦЗКУ), представляющие собой комбинацию ЦЗУ с малошумящим транзисторным усилителем (МШУ) и дополнительными сервисными устройствами. РАС с активными фазированными антенными решетками в данном случае не рассматриваются.

Основные свойства ЦЗУ и преимущества их перед другими типами защитных устройств (газоразрядными, полупроводниковыми и другими) заключаются в следующем:

- ЦЗУ является автономным защитным устройством, т.е. переходит из режима пропускания сигнала в режим защиты и обратно без подачи управляющего сигнала;

- в ЦЗУ отсутствует пик просачивающейся на выход СВЧ мощности, обычно имеющий место в других типах ЗУ в момент воздействия переднего фронта мощного входного импульса;
- в силу специфики взаимодействия резонаторов связи ЦЗУ с электронным лучом устройство в режиме приема выполняет функции частотного фильтра;
- ЦЗУ способны работать с входной импульсной мощностью до 10 кВт и более, при этом ослабление входной мощности в режиме защиты составляет 60-80 дБ и более;
- время восстановления параметров ЦЗУ после окончания мощного импульса на входе составляет 10-20 нс;
- ЦЗУ имеют низкий коэффициент шума (0.7-1.2 дБ) в режиме пропускания сигнала;
- верхняя граница линейности ЦЗУ по входу в режиме пропускания сигнала при компрессии коэффициента передачи на 1 дБ составляет 0.5-3 мВт, при увеличении указанной мощности на 3-5 дБ устройство переходит в режим защиты.

Рассмотрим основные принципы работы ЦЗУ.

## 2. КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ЦЗУ

ЦЗУ – это вакуумный электронно-лучевой малошумящий СВЧ прибор О-типа с поперечным взаимодействием, работа которого основана на возбуждении быстрой циклотронной волны (БЦВ) электронного луча [3-6]. ЦЗУ продолжает линию малошумящих электронно-лучевых параметрических усилителей (ЭПУ) и электростатических усилителей (ЭСУ), разрабатывавшихся в 60-80-е годы 20 века. ЭПУ также известен как лампа Адлера (Adler tube). Релятивистские эффекты при работе приборов данного класса пренебрежимо малы.

На **рис. 1** приведена функциональная схема ЦЗУ в режиме пропускания. Электронная пушка (1) формирует ленточный электронный луч (2), который последовательно проходит входной резонатор (4), разделительную секцию (5), выходной резонатор (6) и оседает в коллекторе (7). Входной и выходной резонаторы

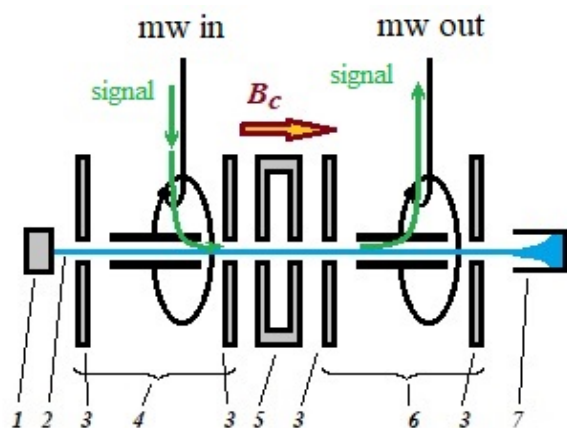


Рис. 1. Функциональная схема ЦЗУ в режиме пропуска.

в плоскости, перпендикулярной оси луча, с двух сторон закрыты дисками (3). Входной резонатор, разделительная секция и выходной резонатор составляют электродинамическую систему ЦЗУ, которая находится в продольном однородном магнитном поле  $B_c$ , обеспечивающем циклотронный резонанс электронов на рабочей частоте.

Входной и выходной резонаторы ЦЗУ – резонаторы с протяженным емкостным зазором, так называемые резонаторы Куччия (Cuccia) [7,8]. Величина электронного зазора в поперечном направлении составляет от 0.1 мм до 0.25 мм для ЦЗУ различных диапазонов частот. Длина зазора резонатора такова, что электрон совершает в резонаторе несколько циклотронных оборотов. Ленточный электронный луч эмитируется оксидным микрокатодом с размерами эмиссионной поверхности 0.02 мм на 0.7 мм, ток луча составляет от 150 мкА до 250 мкА. В ЦЗУ используется магнитная система экранированного типа на постоянных магнитах из сплава самарий-кобальт с термостабилизацией на основе термомагнитных шунтов.

ЦЗУ в режиме пропуска работает следующим образом: во входном резонаторе за счет энергии сигнала в луче возбуждается БЦВ (поперечные колебания электронов с добавленной энергией на циклотронной частоте), переносится лучом в выходной резонатор, где выводится из луча и передается на выход ЦЗУ. При возбуждении сигнальной волны в луче не возникают сгустки электронов, по этой причине передача сигнала линейна до уровня входной

мощности ( $\sim 1$  мВт), при которой начинается оседание электронов на стенках электронного зазора вследствие увеличения амплитуды поперечных колебаний.

Поскольку работа устройства основана на взаимодействии с быстрой волной электронного луча, это позволяет удалять тепловые шумы из сигнальной волны в пассивном устройстве связи (входном резонаторе) одновременно с введением сигнальной мощности в БЦВ. Данный механизм позволяет достигать достаточно низкого собственного коэффициента шума (0.7...1.2 дБ). Рабочая полоса частот ЦЗУ определяется полосой, в которой выполняются на приемлемом уровне условия комплексно-сопряженного согласования проводимостей электронного луча, собственно резонатора и внешней нагрузки.

При увеличении входной СВЧ мощности до уровня выше нескольких мВт электронный луч разрушается во входном резонаторе. В отсутствие луча входной и выходной резонаторы оказываются отделены один от другого разделительной секцией, при этом мощность из входного резонатора в выходной может поступать лишь за счет излучения через отверстие для электронного луча в разделительной секции с значительным ослаблением.

Как известно, классические автономные ЗУ представляют собой высокочастотную линию, соединяющую вход и выход, в которую включены газоразрядные, полупроводниковые (pin-диодные) или другие устройства, импеданс которых при увеличении проходящей мощности до определенного уровня резко и значительно снижается (см. рис. 2).

На Рис. 2 цифрами обозначены: 1 – газоразрядный элемент защиты, 2 и 3 – pin-диодные каскады ЗУ. При достаточно крутом переднем фронте падающего на ЗУ импульса мощности высокого уровня в начальный момент времени, пока не зажегся газовый разряд в

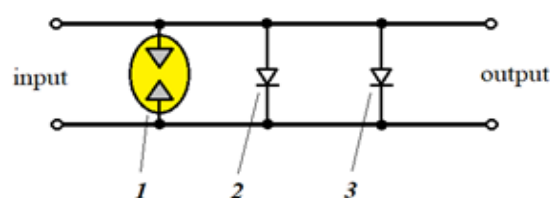


Рис. 2. Функциональная схема классического гибридного ЗУ.

элементе (1) и не открылись рpn-диоды (2) и (3) входная СВЧ мощность поступает на выход ЗУ. При этом формируется пик просачивающейся мощности на выходе устройства.

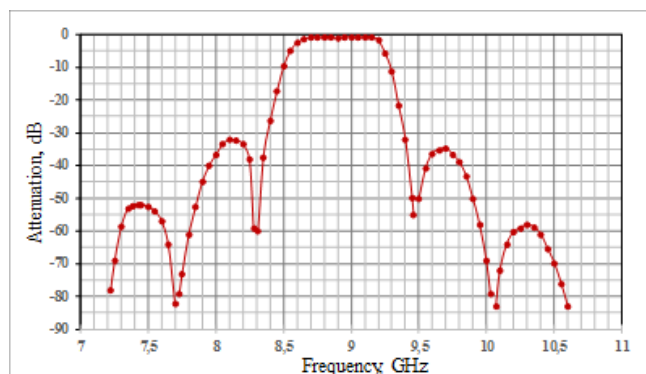
В ЦЗУ отсутствует единая высокочастотная линия, соединяющая вход и выход. В момент перехода ЦЗУ из режима пропускания в режим защиты пиковая мощность на выходе устройства соответствует максимальной энергетической емкости электронного луча на грани его разрушения.

В режиме защиты входной резонатор не нагружен электронным лучом и рассогласован с входной линией (КСВН входа ЦЗУ  $\approx 30$ ), по этой причине до 90% падающей СВЧ мощности отражается от входа ЦЗУ. Оставшаяся мощность рассеивается во входном тракте и входном резонаторе в виде тепла.

### 3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

Рабочая полоса частот ЦЗУ, так же, как и частотные параметры фильтрации входных сигналов (см. **рис. 3**) определяются активной и реактивной проводимостями электронного луча в зазоре резонатора Куччия вблизи циклотронной частоты [4,8] и степенью согласования их с проводимостями резонатора и внешней нагрузки, как указано выше.

Провалы коэффициента передачи (рис. 3) соответствуют частотам отстройки от циклотронного резонанса по углу пролета электронов в зазоре резонатора на  $2\pi n$ , где  $n = \pm 1, \pm 2, \dots$  [4,8]. Физически это объясняется тем, что продольная ось электронного луча (ось, на которой располагаются центры масс электронов в каждом поперечном сечении луча) при возбуждении БЦВ на частотах, отличных от циклотронной,



**Рис. 3.** Пример коэффициента передачи ЦЗУ в широкой полосе частот.

принимает форму слабо закрученной спирали. На частотах провалов коэффициента передачи указанная “спираль” оси электронного луча на длине резонатора имеет целое количество оборотов, по этой причине циклотронное вращение луча в зазоре резонатора не наводит в нем ток (для каждого электрона существует другой электрон в пределах резонатора, колеблющийся в противофазе с ним).

Фильтрующие свойства ЦЗУ выполняют важную роль по подавлению побочных каналов приема в приемных устройствах РЛС [9].

Переход ЦЗУ из режима пропускания в режим защиты связан с увеличением входной СВЧ мощности, увеличением радиуса вращения электронов луча и оседанием их на стенках электронного зазора входного резонатора. По мере увеличения входной мощности сначала начинают оседать краевые электроны луча, коэффициент передачи ЦЗУ снижается, нарушается линейность коэффициента передачи, уменьшается ток луча, достигающий коллектора [10].

Полная мощность, полученная от поля всеми электронами луча, находящимися в зазоре резонатора, может быть получена из выражения:

$$P = \frac{I_0}{2(e/m)} \omega_c^2 R^2, \quad (1)$$

где  $I_0$  – ток луча,  $\omega_c$  – круговая циклотронная частота (соответствует средней частоте рабочей полосы частот),  $R$  – радиус циклотронного вращения электронов,  $e$  – заряд,  $m$  – масса электрона. Исходя из (1) можно оценить мощность, при которой начинается оседание краевых электронов луча:  $P_{\text{lim}} \approx -4$  дБмВт (частота 9 ГГц, ток луча 200 мкА, зазор между лучом и стенкой зазора 15 мкм), что хорошо согласуется с экспериментальными данными на **рис. 4**. Уменьшение тока, проходящего на коллектор, в 1.26 раза (соответствует 1 дБ) совпадает с входной мощностью, при которой имеет место компрессия коэффициента передачи ЦЗУ на 1 дБ:  $P_{-1\text{dB}} \approx 3$  дБмВт. Ослабление входной мощности в режиме защиты составляет  $\approx 75$  дБ.

Максимальная мощность, поступающая на выход ЦЗУ при переходе в режим защиты, не превышает 4-5 мВт, для более высокочастотных ЦЗУ – 8-10 мВт, для низкочастотных ЦЗУ – 1 мВт.

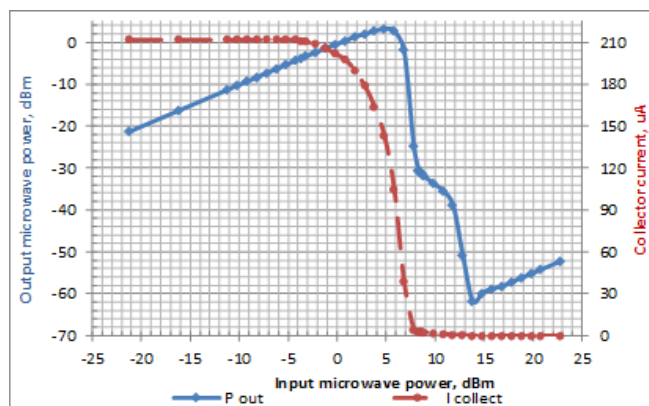


Рис. 4. Граница линейности и переход в режим защиты ЦЗУ диапазона длин волн 3 см.

Одно из основных достоинств ЦЗУ – малое время восстановления. Учитывая высокую подвижность электронов в вакууме время восстановления ЦЗУ определяется скоростью затухания в низкодобротном входном резонаторе электромагнитных колебаний, вызванных воздействием импульса входной мощности, а также временем пролета электронов луча между входным и выходным резонаторами. При этом на начальном этапе (этап 1) восстановления прохождения сигнала резонатор нагружен внешней нагрузкой и собственными потерями (типичная добротность резонатора  $Q_1 \approx 25$ ). На следующем этапе (этап 2) восстанавливается прохождение луча в зазоре и, соответственно, добротность резонатора понижается от уровня  $Q_1$  до максимально нагруженного уровня  $Q_3 \approx 8$  (этап 3 – прохождение луча и сигнала восстановлено). Усредненную по переходному этапу 2 добротность можно полагать равной  $Q_2 \approx 16$ .

Как известно, время затухания амплитуды колебаний в контуре с добротностью  $Q$  от уровня мощности  $P_1$  до уровня  $P_2$  определяется выражением:

$$t = \frac{Q}{2\pi f} \ln \frac{P_1}{P_2}, \quad (2)$$

где  $t$  – время затухания колебаний,  $f$  – частота колебаний.

Для диапазона длин волн 3 см оценки по выражению (2) при типичных уровнях мощности, приведенных на рис. 4, дают следующие значения: продолжительность этапа 1 –  $t_1 \approx 4$  нс для мощности входного импульса 1 кВт и  $t_1 \approx 5$  нс для мощности входного импульса 10 кВт (90% падающей СВЧ мощности

отражается от рассогласованного резонатора). Продолжительность этапа 2 –  $t_2 = 0.6$  нс.

При типичном времени пролета электронов между центрами входного и выходного резонаторов 2-4 нс время восстановления ЦЗУ диапазона длин волн 3 см составит  $t_r \approx 10$  нс. В диапазоне длин волн 10 см время восстановления ЦЗУ  $t_r \approx 22-26$  нс.

За дополнительное время от 3 до 10 нс (продолжительность этапа 3 в зависимости от диапазона частот) в ЦЗУ восстанавливается максимальная чувствительность, соответствующая коэффициенту шума 1-1.5 дБ.

В настоящих приведенных оценках времени восстановления предполагается идеальный задний фронт мощного входного СВЧ импульса с нулевой длительностью.

Как отмечалось выше, большая часть падающей на вход ЦЗУ СВЧ мощности высокого уровня отражается от рассогласованного резонатора. Для обеспечения предельно малого времени восстановления устройства следует отраженную мощность направить в нагрузку и предотвратить ее переотражение от элементов тракта на входе ЦЗУ и собственно входа ЦЗУ. На рис. 5 приведены осциллограммы затухания СВЧ энергии на выходе ЦЗУ при окончании входного импульса мощностью 23 дБмВт с длительностью среза (заднего фронта) импульса 0.5 нс. Рис. 5а – продолжительность процесса

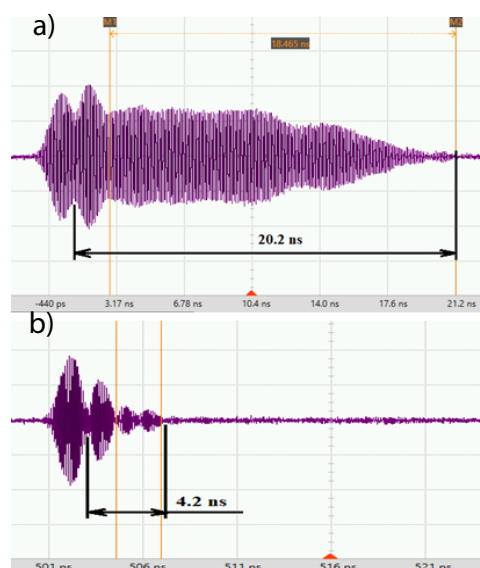


Рис. 5. Осциллограммы времени восстановления ЦЗУ диапазона длин волн 3 см: а) без вентиля на входе, длина соединительного кабеля генератор – вход ЦЗУ 0.9 м; б) к входу ЦЗУ подсоединен ферритовый вентиль.

затухания 20.2 ns обусловлена распространением отраженной от входа ЦЗУ мощности к генератору мощного сигнала с последующим отражением мощности от выхода генератора и повторным поступлением ее на вход ЦЗУ при длине соединительного кабеля 0.9 м. Вздутие на осциллограмме слева от временного интервала 20.2 ns обусловлено прохождением через ЦЗУ среза входного импульса (левая граница временного интервала 20.2 ns на осциллограмме разделяет режимы работы ЦЗУ: слева – режим защиты от входного импульса, справа – режим пропускания при отсутствии входного импульса. Рис. 5b – аналогично для интервала 4.2 ns).

Использование ферритового вентиля непосредственно на входе ЦЗУ (рис. 5b) позволяет исключить переотражение СВЧ мощностей в тракте и наблюдать собственное время восстановления ЦЗУ, в данном случае 4.2 ns.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ЦЗУ является весьма привлекательным устройством для применения в приемниках РАС в силу физических принципов, на которых основана его работа:

- взаимодействие с быстрой волной электронного луча позволяет удалять тепловые шумы из луча в резонаторном устройстве связи и достигать низкого коэффициента шума;
- взаимодействие с поперечной (циклотронной) волной не приводит к образованию сгустков электронного заряда в луче и, таким образом, обеспечивает высокую линейность устройства;
- работа с электронным лучом в вакууме – использование заряженных частиц с максимальной подвижностью – позволяет достичь сверхмалого времени восстановления защитного устройства;
- связь входа и выхода ЦЗУ в режиме пропускания через электронный луч обеспечивает отсутствие пика просачивающейся мощности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Быстров РП, Потапов АА. Функциональные устройства и элементная база радиолокационных систем. *РЭНСИТ*, 2009, 1(1-2):43-58.

2. Быстров РП, Дмитриев ВГ, Потапов АА, Перунов ЮМ, Черепенин ВА. Электромагнитные системы и средства преднамеренного воздействия на физические и биологические объекты. *РЭНСИТ*, 2014, 6(2):129-169.
3. Ванке ВА, Лопухин ВМ, Саввин ВА. Сверхмалошумящие усилители циклотронных волн. *УФН*, 1969, 99(4):545-569.
4. Ванке ВА. Поперечные волны электронного потока в микроволновой электронике. *УФН*, 2005, 175(9):957-978.
5. Будзинский ЮА, Кантюк СП. Электростатические усилители. *Электронная техника. Серия 1. СВЧ техника*, 1993, (1):21-27.
6. Manheimer WM, Ewell GW. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 1998, 26(4):1282-1296.
7. Cuccia CL. The Electron Coupler – A Developmental Tube for Amplitude Modulation and Power Control at Ultra-High Frequencies. Part I. *RCA Review*, 1949, 10(2):270-303.
8. Dubravec V. Wellentheorie des Cuccia-Kopplers. *Archiv für Elektronik und Übertragungstechnik*, 1964, 18(10):585-593.
9. Быковский СВ, Градова ТИ, Орехов МБ. Параметры электромагнитной совместимости циклотронно-защищенных комплексированных усилителей (ЦЗКУ). *Вестник воздушно-космической обороны*, 2020, (1):51-54.
10. Быковский СВ, Будзинский ЮА, Калина ВГ, Котов ВЕ, Саврухин ОА. Циклотронные защитные устройства: граница линейности и переход в режим защиты. *Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника*, 2018, (3):43-49.
11. Быковский СВ, Будзинский ЮА, Калина ВГ, Котов ВЕ, Николаев СВ, Саврухин ОА. Циклотронные защитные устройства: время восстановления параметров. *Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника*. 2020, (1):12-21.

**Быковский Сергей Васильевич**

*к.т.н.*

НПП «Исток» им. А.И. Шокина»

2а, ул. Вокзальная, Фрязино 141190,

Московская обл., Россия

serbyko@mail.ru; bykovskiy@istokmw.ru.