

УДК 621.385

Эффективность магнитной защиты бортовой цезиевой атомно-лучевой трубки «Успех-4М»¹

Мирющенко Н. И., Духина Н. Г., Плешанов С. А.,
Ревенко К. В., Чугунов В. В., Агапов А. Н.

АО «НПП “Исток” им. Шокина»

*ул. Вокзальная, д. 2а, Фрязино, Московская обл., 141190, Российская Федерация
miruha007@mail.ru*

Получено: 13 декабря 2020 г.

Отрецензировано: 14 декабря 2020 г.

Принято к публикации: 15 декабря 2020 г.

Аннотация: Проведено численное моделирование системы магнитного экранирования для атомно-лучевой трубки «Успех-4М», состоящей из 4 тонкостенных коаксиальных цилиндров, изготовленных из сплавов марки 79НМ и 81 НМА, с целью уменьшения погрешности при расчете эффективности экранирования используемой магнитной защиты с учетом всех конструктивных особенностей атомно-лучевой трубки. Изучен спектр зеемановского резонанса атомно-лучевой трубки «Успех-4М», помещенной во внешнее постоянное магнитное поле. Оценен коэффициент магнитного экранирования атомно-лучевой трубки «Успех-4М» и магнитного сдвига частоты нулевого перехода при помощи анализа сдвига частоты зеемановских резонансов.

Ключевые слова: атомно-лучевая трубка, экранирование, коэффициент экранирования, магнитное поле, магнитная защита, многослойный экран, магнитный сдвиг частоты, компьютерное моделирование.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Мирющенко Н. И., Духина Н. Г., Плешанов С. А., Ревенко К. В., Чугунов В. В., Агапов А. Н. Эффективность магнитной защиты бортовой цезиевой атомно-лучевой трубки «Успех-4М» // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2020. Т. 3, № 3. С. 308—324.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Мирющенко, Н. И. Эффективность магнитной защиты бортовой цезиевой атомно-лучевой трубки «Успех-4М» / Н. И. Мирющенко, Н. Г. Духина, С. А. Плешанов, К. В. Ревенко, В. В. Чугунов, А. Н. Агапов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2020. — Т. 3, № 3. — С. 308—324.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 30-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2020 (Севастополь, РФ, 6—12 сентября 2020 г.).

Effectiveness of a magnetic protection on-board cesium atomic beam tube “Uspeh-4M”

N. I. Miryushchenko, N. G. Dukhina, S. A. Pleshanov,
K. V. Revenko, V. V. Chugunov, and A. N. Agapov

*JSC RPC “Istok” n. a. Shokin
2a, Vokzalnaya str, Fryazino, Moscow Region, 141190, Russian Federation
miruha007@mail.ru*

Received: December 13, 2020

Peer-reviewed: December 14, 2020

Accepted: December 15, 2020

Abstract: *A numerical simulation of a magnetic shielding system for an atomic beam tube “Uspeh-4M”, consisting of 4 thin-walled coaxial cylinders made of 79NM and 81NMA alloys, was carried out in order to reduce the error in calculating the shielding efficiency of the used magnetic shielding, taking into account all the design features of atomic beam tube “Uspeh-4M”. The spectra of Zeeman resonance of atomic beam tube “Uspeh-4M”, placed in external constant magnetic field were studied. The analysis of the frequency shift of the Zeeman resonances made it possible to estimate the coefficient of atomic beam tube “Uspeh-4M” magnetic screening and magnetic shift of the zero transition frequency.*

Keywords: *atomic beam tube, screening, screening coefficient, magnetic field, magnetic screen, multilayer screen, magnetic frequency shift, computer modeling.*

For citation (IEEE): N. I. Miryushchenko et al. “The effectiveness of a magnetic protection on-board cesium atomic-beam tube Uspeh-4M”, *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 3, no. 3, pp. 308–324, 2020. (In Russ.).

1. Введение

Атомно-лучевые трубки (АЛТ) служат в качестве квантовых дискриминаторов частоты, использование которых позволяет обеспечить генерацию чрезвычайно точных сигналов частоты бортовых синхронизирующих устройств [1].

Цезиевые АЛТ с магнитной селекцией являются ключевыми элементами Российской глобальной навигационной спутниковой системы (Глонасс), обеспечивающими непревзойденную точность определения координат. Глобальность системы обеспечивается функционированием на орбитах набора видимых из любой точки Земли спутников, непрерывно передающих высокоточные измерительные сигналы.

В России лидером по производству высококачественных атомно-лучевых трубок на пучке атомов цезия является НПП «Исток» им. Шокина, где начиная с 1965 года разрабатываются и исследуются цезиевые атомно-лучевые трубки [2]. Разработка АЛТ на пучке атомов цезия в НПП «Исток» им. Шокина была обусловлена острой необходимостью в квантовых стандартах частоты для применения в Государственной службе времени, координации работы систем противовоздушной и противоракетной обороны, радионавигации, радиоастрономии, геодезии, фундаментальных научных исследованиях и т. д. Значительных результатов удалось добиться в последние 10 лет.

Цезиевые атомно-лучевые трубки с магнитной селекцией атомных состояний, которые выпускаются на НПП «Исток» им. Шокина, получили широкое распространение как в наземной, так и в бортовой аппаратуре. На сегодняшний день цезиевые АЛТ являются ключевыми элементами, определяющими точностные характеристики российской системы ГЛОНАСС, и обеспечивают длительное поддержание частоты или времени с относительной точностью на уровне $5,0 \cdot 10^{-14}$ — $1,0 \cdot 10^{-14}$.

25 октября 2020 года ракетой-носителем «Союз-2.1Б» был успешно выведен на орбиту новейший навигационный спутник «Глонасс-К1 № 15Л», на борту которого размещена цезиевая АЛТ «Успех-4М». Запуск на орбиту аппарата данной серии состоялся впервые еще в 2014 году. Таким образом, он стал третьим по счету космическим аппаратом (КА) «Глонасс-К» в составе российской навигационной группировки; первый был запущен в 2011 году, второй — в 2014 г. Сейчас на орбите находятся уже 28 рабочих аппаратов: 25 спутников серии «Глонасс-М» и 3 спутника серии «Глонасс-К». Самый старый спутник серии «Глонасс-М», на борту которого размещена цезиевая АЛТ «Успех-3АМ», работает в навигационной группировке с 2006 года. Гарантия на АЛТ «Успех-3АМ» составляет 7 лет, т. е. она уже проработала в 2 раза дольше, чем в нее изначально закладывали разработчики.

Следующими на очереди являются навигационные аппараты «Глонасс-М» № 61 и «Глонасс-К» № 16Л, которые ориентировочно должны запущены с космодрома «Плесецк» в скором будущем. КА «Глонасс-М» № 61 является последним оставшимся в наличии аппаратом в серии «Глонасс-М». После его запуска выходящие из строя КА «Глонасс-М» будут плавно проведены на серию «Глонасс-К», на борту которых будет расположена АЛТ «Успех-4М».

Настоящая работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию эффективности магнитной защиты бортовых цезиевых

АЛТ «Успех-4М» от влияния внешних магнитных полей. Рассмотрено влияние остаточного внешнего магнитного поля на частотные параметры АЛТ, в частности, на смещение вершины зеемановского резонанса.

В данной работе для более точного расчета эффективности экранирования цезиевых АЛТ «Успех-4М» использованы численные методы решения уравнений, так как аналитически решить задачу определения магнитного поля во внутреннем пространстве АЛТ с высокой точностью не представляется возможным. Это связано с тем, что функциональные узлы АЛТ «Успех-4М» имеют сложную асимметричную конфигурацию, и они практически не поддаются точному аналитическому расчету.

Построена *3d*-модель с учетом конструктивных особенностей магнитомягких материалов АЛТ «Успех-4М» и исследовано влияние конструктивно-технологических особенностей изготовления системы многослойных магнитных экранов на величину напряженности остаточного магнитного поля в области дрейфа атомного потока в АЛТ «Успех-4М» с целью оценки эффективности экранирования применяемой магнитной защиты.

Получены спектры зеемановских резонансов прецизионных бортовых АЛТ «Успех-4М», которые были получены с помощью катушек Гельмгольца и радиоэлектронного блока для исследования выходных электрических характеристик цезиевых АЛТ. По полученным данным можно провести оценку эффективности экранирования АЛТ «Успех-4М» и магнитного сдвига частоты нулевого перехода.

2. Принцип работы цезиевой АЛТ с магнитной селекцией

Известно, что наиболее высокую долговременную стабильность при высокой точности номинального значения частоты генерируемых колебаний обеспечивают квантовые стандарты частоты на АЛТ. Цезиевые атомно-лучевые трубки занимают особое место, поскольку эталон времени базируется на микроволновом переходе в атоме *Cs*.

Атомно-лучевая трубка на пучке атомов Cs^{133} относится к классу пучковых квантовых устройств. Функциональные узлы классической цезиевой АЛТ «Успех-4М» показаны на рисунке 1. АЛТ «Успех-4М» является прибором с магнитной селекцией атомов цезия и разрабатывается с целью применения в аппаратуре бортового синхронизирующего устройства (БСУ) КА «Глонасс-К».

В отличие от движения атомов или молекул, образующих газ, в атомных или молекулярных пучках частицы движутся в одном направлении. Для получения атомных пучков необходим хороший вакуум: присутствие газа дает рассеяние пучка. Поэтому в цезиевых АЛТ используется магнит-

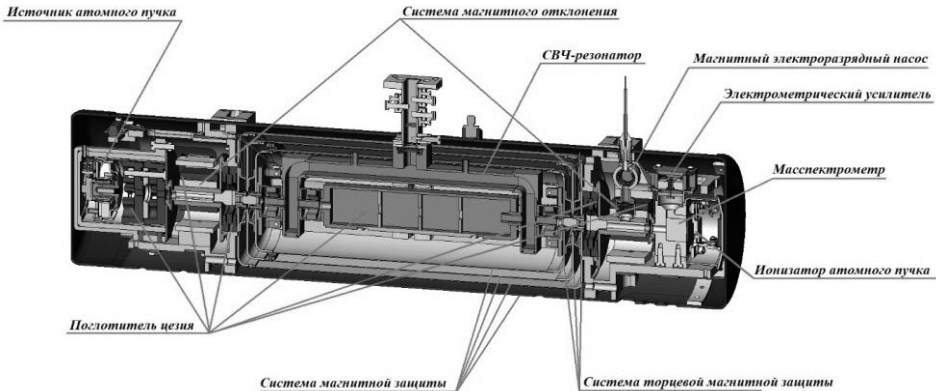


Рис. 1. Функциональные узлы цезиевой АЛТ.

Fig. 1. Functional units of cesium ABT

ный электроразрядный насос, который поддерживает в пролетном пространстве АЛТ высокий вакуум. Для поддержания высокого вакуума внутри АЛТ также применяются система газопоглотителей, которая размещается на всем протяжении пролетного пространства атомного пучка.

Принцип работы АЛТ «Успех-4М» заключается в следующем. Несколько грамм изотопа цезия размещаются в источнике АЛТ. При разогреве источника до температуры $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ в нем образуются пары цезия, которые формируют поток атомов цезия с тепловым распределением скоростей, которые покидают источник через систему коллиматоров. В исходном состоянии атомы цезия равновероятно распределены по всем магнитным состояниям ($F = 3$ и $F = 4$) нижнего энергетического уровня $6^2S_{1/2}$. Траектория движения пучка атомов цезия показана на рисунке 2 (а). Если исключить попадания пучка на стенки трубки, приводящие к отражению или рассеянию пучка, частицы в пучке движутся прямолинейно и равномерно. Благодаря значительной скорости атомов влиянием поля земного тяготения можно пренебречь, считая движение частиц тепловым движением.

Пучок попадает в первый магнит, производящий сильное неоднородное магнитное поле ($\approx 50000\text{ Э/см}$). Атомы цезия обладают магнитным дипольным моментом, поэтому испытывают действие поперечной силы, направление которой зависит от того, на каком энергетическом уровне ($F = 3$ или $F = 4$) находится атом. Под действием этой силы атомы отклоняются в направлении СВЧ-резонатора (эффект Штерна — Герлаха). Отклонение составляет примерно 1° . Остальные атомы направляются в систему газопоглотителей. Благодаря изменению угла наклона источника атомного пучка φ можно выбирать нужный энергетический уровень атомов для работы и их скорость.

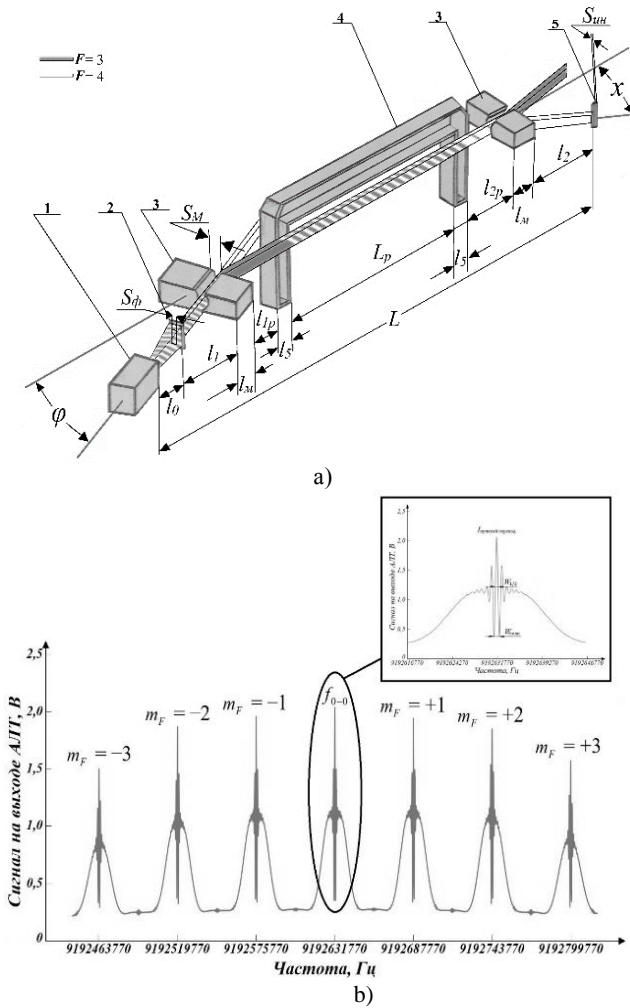


Рис. 2. Принцип работы АЛТ с магнитной селекцией.

a) 1 — источник атомного пучка; 2 — диафрагма; 3 — система магнитной селекции; 4 — резонатор; 5 — ионизатор. L — 410; l_0 — 4; l_1 — 4; l_M — 30; l_{1p} — 55,2; l_5 — 13; L_p — 174,6; l_{2p} — 55,2; l_2 — 31; S_ϕ — 1,6; S_M — 12; $S_{ин}$ — 1,1; φ и χ — подбираются индивидуально для каждой АЛТ при настройке. Все размеры указаны в мм;
 б) Зеемановские резонансы.

Fig. 2. The principle of operation of ABT with magnetic selection. a – 1 – atomic beam source; 2 – diaphragm; 3 – magnetic selection system; 4 – resonator; 5 – ionizer. L – 410; l_0 – 4; l_1 – 4; l_M – 30; l_{1p} – 55,2; l_5 – 13; L_p – 174,6; l_{2p} – 55,2; l_2 – 31; S_ϕ – 1,6; S_M – 12; $S_{ин}$ – 1,1; φ and χ – is selected individually for each ABT when setting up. All dimensions are in mm;
 б) Zeeman resonances

Пучок атомов затем пересекает сверхвысокочастотную область взаимодействия, которая включает в себя СВЧ-резонатор Рамзея. Атомы последовательно подвергаются действию двух магнитных полей на сверхвысоких частотах (СВЧ), осциллирующих на частоте 9 192 631 770 Гц, и разделенных областью с отсутствующей осцилляцией. Данный способ соответствует возбуждению по схеме Рамзея. В результате атомы цезия меняют сверхтонкий подуровень и переходят с одного энергетического подуровня на противоположный ($F = 3 \leftrightarrow F = 4$).

Вся область взаимодействия атома цезия с СВЧ полем имеет магнитные экраны для того, чтобы защитить ее от внешних магнитных полей и их изменений. Внутри системы магнитных экранов создается однородное и стабильное магнитное поле порядка 80 мЭ.

Под воздействием на атомы цезия магнитного поля происходит расщепление его энергетических уровней (эффект Зеемана). Расщепление уровней приводит к расщеплению спектральных линий на $2F+1$ равноотстоящих подуровней, причем величина расщепления зависит от множителя Ланде. До наложения поля состояния, отличающиеся значениями квантового числа m_F , обладали одинаковой энергией, т. е. наблюдалось вырождение по квантовому числу m_F . Магнитное поле снимает вырождение по m_F . Спектр семи зеемановских резонансов показан на рисунке 2(b). Расщепление необходимо во избежание искажений из-за расщепления переменным полем.

По оси атомного пучка на концах каждого плеча U -образного резонатора установлены заградительные волноводы для предотвращения проникновения электромагнитного излучения через отверстия в резонаторе, чтобы не создавалась бегущая волна, параллельная атомному пучку.

После прохождения СВЧ-резонатора атомы попадают в область второго магнита, который отклоняет атомы, совершившие сверхтонкий переход в направлении детектора на поверхностной ионизации. Благодаря изменению угла наклона индикатора χ можно выбирать нужный энергетический уровень атомов для работы и их скорость.

Вольфрамовая лента ионизатора нагревается до высоких температур, чтобы предотвратить образование поверхностных слоев из-за поглощенных газов. Поскольку работы выхода у атома цезия 1,7 эВ, а у вольфрама 4,5 эВ, то атом цезия легко ионизируется на раскаленной ленте, отдавая внешний электрон.

Ионный поток с ленты ионизатора притягивается в область масс-спектрометра при помощи фокусирующего электрода, где ионный поток фильтруется для того, чтобы исключить нежелательные ионы, которые

образуются вблизи ионизатора. Отфильтрованные ионы цезия далее попадают в область электрометрического усилителя, где усиливается сигнал.

Полученное таким образом напряжение составляет выходной сигнал цезиевой АЛТ. Он пропорционален вероятности того, что атомы совершили переход $F = 3, m_F = 0 \leftrightarrow F = 4, m_F = 0$.

3. Влияние нестабильности магнитного поля на частотные параметры АЛТ

Одним из важнейших требований, предъявляемых к цезиевым АЛТ, является снижение магнитного сдвига частоты рабочего перехода атома цезия, возникающего под воздействием внешних магнитных полей [3]. Для этого необходимо, чтобы в области взаимодействия атомного пучка с СВЧ полем в резонаторе, установленном внутри системы магнитных экранов, обеспечивалась глубокая степень экранировки с коэффициентом экранирования не менее 10^5 . Как правило, источниками возмущающих внешних магнитных полей являются постоянно действующее магнитное поле Земли (около $0,5 \text{ Э}$) и поля рассеяния других приборов, работающих в одном блоке с АЛТ.

В АЛТ «Успех-4М» в качестве материалов экранов используются магнитомягкие сплавы с большой магнитной проницаемостью, такие как: сплав 79НМ и сплав 81НМА. Данные сплавы требуют предварительного высокотемпературного отжига. Необходимость в таком отжиге, а также конструктивные ограничения приводят к необходимости использования разборных конструкций, в которых цилиндрическая часть магнитного экрана не сварена с торцевыми частями, а соединена с ними винтами, стяжными хомутами и т. д. В таких экранах неизбежно наличие воздушных зазоров между цилиндрической и торцевыми частями, уменьшающими коэффициент экранирования, при этом наиболее существенно зазоры влияют на коэффициент экранирования.

Коэффициент экранирования системы магнитных экранов рассчитывается по формуле:

$$K_{\text{Э}} = \frac{\Delta H_{\text{внеш}}}{\Delta H_{\text{внутр}}}, \quad (1)$$

где $\Delta H_{\text{внеш}}$ — напряженность внешнего магнитного поля, $\Delta H_{\text{внутр}}$ — напряженность магнитного поля внутри системы магнитных экранов.

Принцип действия магнитного экрана состоит в том, что отражая и направляя поток магнитной энергии, создаваемый источниками поля, экран отводит его от защищаемой области пространства, не допуская в эту область.

Нарушение однородности постоянного магнитного поля, имеющие место в реальных АЛТ, приводят к разнообразным искажениям резонансной линии, как показано на рис. 3 (а). При этом нередко наблюдается существенное уменьшение интенсивности резонанса, вплоть до полного исчезновения интерференционной картины Рамзея.

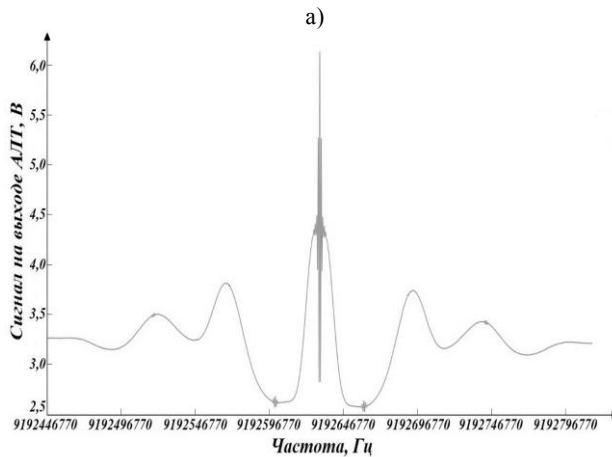
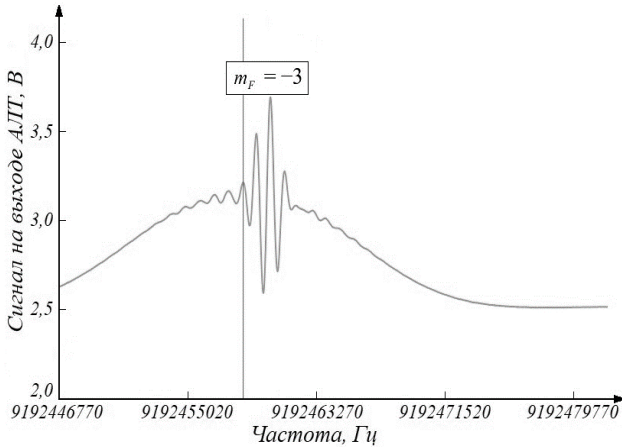


Рис. 3. Интерференционная картина Рамзея при недостаточной магнитной защите АЛТ.
а) Смещение центрального пика 3-го зеемановского резонанса из-за недостаточной магнитной защиты; б) Искажения резонансной частоты из-за недостаточной магнитной защиты.

Fig. 3. Ramsey interference pattern with insufficient magnetic protection APT.
a – Displacement of the central peak of the third Zeeman resonance due to insufficient magnetic shielding; b – Distortion of the resonant frequency due to insufficient magnetic protection

Наличие неоднородности магнитного поля в пролетном пространстве эквивалентно в «атомной» системе отсчета действию на атом возмущения, зависящего от времени. Это возмущение может индуцировать дополнительные переходы между энергетическими уровнями атома, искажающие резонансную линию наблюдаемого перехода, как это показано на рис. 3 (b).

На рисунке 3 (a) показана резонансная линия 3-го зеемановского уровня, полученная при исследовании магнитной защиты АЛТ «Успех-3БМ». Вертикальной линией показана частота, в которой должна находиться верхний пик резонанса Рамзея, но из-за недостаточной магнитной защиты она была смещена вправо.

На рисунке 3 (b) показана интерференционная картина Рамзея, полученная при исследовании эффективности торцевой магнитной защиты АЛТ «Успех-4М». В данном случае рассматривалась АЛТ «Успех-4М» с одной парой магнитной торцевой защитой. Две другие пары были заменены на алюминиевые торцевые крышки. На полученном графике видно сильное искажение резонансной линии Рамзея из-за плохой магнитной защиты в области СВЧ-резонатора.

В случае цезиевой АЛТ рабочим переходом является переход между уровнями сверхтонкой структуры основного состояния ($F=4, m_F=0 \leftrightarrow F=3, m_F=0$), который принято считать нулевым (часовым) переходом. Поскольку многоквантовые переходы маловероятны, то резонансная линия подвергается искажениям главным образом за счет переходов (рис. 2 (b)):

$$\begin{aligned}(F=4, m_F=0) &\leftrightarrow (F=4, m_F=\pm 1) \\(F=3, m_F=0) &\leftrightarrow (F=3, m_F=\pm 1)\end{aligned}$$

Действительная частота нулевого («часового») перехода f в цезиевых АЛТ зависит от напряженности внешнего магнитного поля [4]:

$$f = f_{0-0} + 427,45 \cdot H_c^2, \text{ Гц} [H_c] \Leftrightarrow [\text{Э}], \quad (2)$$

где $f_{0-0} = 9\,192\,631\,770$ Гц — частота нулевого перехода для цезия, H_c — напряженность внешнего магнитного поля.

Для оценки качества систем магнитного экранирования удобнее использовать разрешенные правилами отбора зеемановские резонансы $m_F = \pm 1; \pm 2; \pm 3$ (рис. 2 (b)), которые описываются следующей формулой:

$$f = f_{0-0} + 7,00 \cdot 10^5 \cdot m_F \cdot H_c, \text{ Гц} \quad (3)$$

С помощью зеемановских резонансов можно точно вычислить коэффициент экранирования системы магнитных экранов по величине магнитного сдвига частоты.

Из формул (2) и (3) можно увидеть, что частота часового и зеemannовских переходов сильно зависят от величины магнитного поля внутри системы магнитных экранов. Поэтому при разработке бортовых АЛТ «Успех-4М» особое внимание было уделено магнитной защите для улучшения стабильности частоты.

4. Результаты компьютерного моделирования магнитной защиты АЛТ «Успех-4М»

В работе [1] установлено, что аналитический расчет коэффициента магнитного экранирования цезиевых АЛТ, состоящих из 4 тонкостенных цилиндрических экранов, дает завышенный результат, поскольку в общем случае аналитически решить задачу определения магнитного поля во внутреннем пространстве АЛТ с высокой точностью не представляется возможным. Это происходит по причине того, что функциональные узлы АЛТ имеют сложную асимметричную конфигурацию, и практически не поддаются точному аналитическому расчету. Для более точного расчета также следует учитывать все конструктивные особенности АЛТ «Успех-4М», такие как: отверстия для пролета атомного пучка, отверстия для ввода СВЧ в резонатор, катушки для создания поля подмагничивания в области резонатора, отверстия в магнитных экранах для симметрирования плеч резонатора и т. д., поэтому следует использовать численные методы решения уравнений.

При разработке промышленных АЛТ на пучке атомов цезия используются приближенные методы расчетов узлов, однако при этом решающую роль играет интуиция разработчика и экспериментальные исследования на лабораторных макетах приборов. Возможность совершенствования методики расчетов функциональных узлов цезиевых АЛТ существует благодаря развитию методов компьютерного моделирования магнитных систем и систем формирования потоков заряженных частиц на основе трехмерных математических моделей, хорошо апробированных в области проектирования магнитных и электронно-оптических систем ЭВП СВЧ.

На рисунке 4а показан общий вид моделируемой магнитной системы АЛТ «Успех-4М» с многослойным экраном, отклоняющими постоянными магнитами и соленоидами в виде круглых катушек и прямоугольных рамок с постоянным током. Данная 3d модель использовалась для расчетов магнитного поля внутри системы магнитной защиты АЛТ «Успех-4М» с помощью численных методов. Наружный экран (не показан на рисунке 4а) является одновременно корпусом АЛТ. Внутри корпуса установлены три экрана 1-3 в виде отрезков цилиндрических труб с закрытыми торцами

6-8 (торцевой магнитной защитой). Все экраны разделены между собой узкими коаксиальными и торцевыми зазорами. Цилиндрические экраны 1-3 с торцами 6-8 выполнены из сплава марки 81НМА, наружный экран АЛТ – из сплава марки 79НМ.

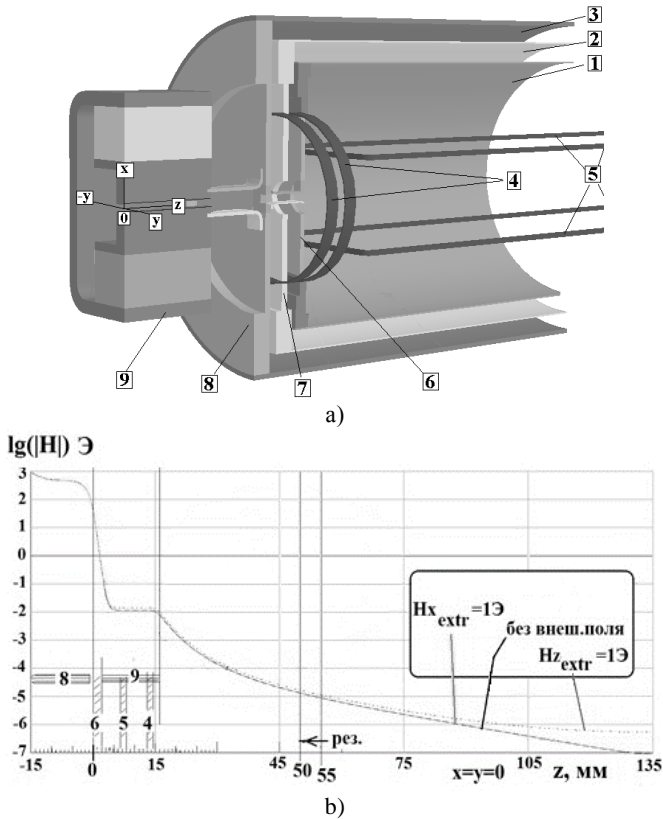


Рис. 4. Компьютерное моделирование системы магнитной защиты АЛТ «Успех-4М».
 а) Общий вид 3d модели системы магнитной защиты АЛТ «Успех-4М»;
 б) Влияние внешних полей $H_{z\text{extr}}=1\text{ Э}$ и $H_{x\text{extr}}=1\text{ Э}$ в системе многослойных магнитных экранов с наружным экраном и без него.

Fig. 4. Computer simulation of the magnetic protection system ABT “Uspeh-4M”.
 а – General view of the 3d model of the magnetic protection system ABT “Uspeh-4M”;
 б – Influence of external fields $H_{z\text{extr}}=1\text{ Oe}$ and $H_{x\text{extr}}=1\text{ Oe}$ in a system of multilayer magnetic shields with and without an external shield

Для прохождения ленточного атомного пучка в центре дисков экранов имеются отверстия: круглые диаметром 10 мм — в 6-м и 7-м дисках, щелевидное размером 2,5 на 7 мм — в 8-м диске.

С внешней стороны торцевой магнитной защиты установлены магнитные системы на постоянных магнитах 9, предназначенная для селекции атомов цезия по их энергетическим состояниям. Между торцами находятся соленоиды 4. Внутри первого экрана установлены рамки 5 в виде прямоугольных каркасов с натянутыми на них проводами.

Ярмо магнита и внешние пластины выполнены из стали «армко», экраны с торцами и внутренние пластины — из сплава марки 81НМА, наружный экран — из сплава марки 79НМ. В расчетах использовались справочные характеристики магнитомягких материалов: стали «армко» и пермаллоя. Постоянные магниты — сплав SmCo25.

Расчет эффективности системы магнитных экранов проводился с учетом воздействия внешнего однородного магнитного поля напряженностью 1 Э, ориентированного в двух направлениях — вдоль оси X и Z системы магнитных экранов. Для снижения трудоемкости и повышения точности расчетов на всех плоскостях симметрии, присущих проектируемого варианту конструкции экранов, задавались соответствующие или тангенциальные граничные условия для решения полевых задач.

Результаты сравнительного анализа экранирующих свойств системы экранов АЛТ «Успех-4М» показаны на рисунке 4б.

Анализируя полученный график, можно увидеть, что напряженность поля внутри системы магнитных экранов цезиевой АЛТ при воздействии внешнего однородного поля $H_{x_{\text{extr}}} = 1$ Э соответствует коэффициенту экранирования, равному 11 000 000. При воздействии поля $H_{z_{\text{extr}}} = 1$ Э коэффициент экранирования равен 2 000 000.

По результатам моделирования установлено, что воздействие внешнего однородного поля $H_{x_{\text{extr}}} = 1$ Э незначительно влияет на изменение магнитного поля внутри системы магнитных экранов и приблизительно равно значению экранирования при нулевом значении внешнего магнитного поля.

Установлено, что в системе магнитных экранов АЛТ «Успех-4М» имеет место сложное распределение магнитного поля вдоль оси пролета атомного пучка (ось Z).

В связи с этим можно сделать вывод, что коэффициент экранирования системы магнитных экранов АЛТ «Успех-4М» составляет 1 000 000 — 10 000 000 в зависимости от направления внешнего однородного магнитного поля.

Следует отметить, что справочные значения начальной и максимальной проницаемости материалов, которые применялись при данном методе расчета, получаются путем обработки кривых намагничивания, когда каждая точка кривой намагничивания достигается многократным переключением направления намагничивающего поля заданной напря-

женности. В реальных условиях эксплуатации магнитного экрана изменение намагниченности его стенок происходит, в общем случае, хаотичным образом. По этой причине реальные значения начальной и максимальной проницаемости материала экрана могут оказаться заметно ниже справочных данных.

Не следует также забывать, что намагниченность в стенке экрана изменяется от нулевого значения на полюсах Земли к максимальной на экваторе, что существенно сказывается на эффективности экранирования системы магнитной защиты.

5. Исследование сдвига частоты центральных пиков зеemanовских резонансов магнитных АЛТ «Успех-4М»

Одной из важнейших характеристик цезиевых АЛТ является магнитный сдвиг частоты (МСЧ) и коэффициент экранирования под воздействием внешних магнитных полей заданной величины и ориентации.

Величина МСЧ зависит от экранирующих свойств системы магнитной защиты АЛТ, от величины внешнего магнитного поля, а также от топографии магнитного поля, проникающего в переходную область между селектором атомных состояний и СВЧ-резонатором, в котором происходит взаимодействие атомного пучка с СВЧ полем.

Получены экспериментальные данные по сдвигу частоты центральных пиков зеemanовских резонансов прецизионных бортовых АЛТ «Успех-4М», которые были получены с использованием катушек Гельмгольца, при заданных величинах внешнего магнитного поля. Напряженность внешнего магнитного поля контролировалось по величине тока в обмотках катушек. Напряженность слабого магнитного поля внутри системы магнитных экранов исследовалось методом высокочастотных зеemanовских переходов. В исследовании применен новый высокостабильный СВЧ измерительный блок с автоматической перестройкой частоты в составе стендовой контрольно-измерительной аппаратуры, предназначенной для исследования выходных параметров АЛТ [5]. Недостатком выбранного метода исследования является то, что он дает возможность определить лишь изменение средней величины напряженности внутри АЛТ, но не позволяет получать информацию о возможном изменении топографии этого поля при воздействии внешних полей.

Исследование АЛТ «Успех-4М» проводилось в положении, когда направление внешнего магнитного поля было параллельно оси прибора и перпендикулярно направлению внутреннего магнитного поля. Результаты испытания представлены на рисунке 5.

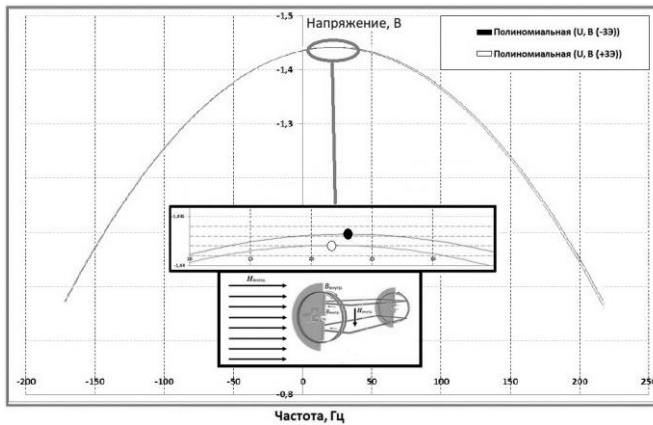


Рис. 5. Влияние внешнего магнитного поля на сдвиг частоты вершины зеемановского резонанса в АЛТ «Успех-4М».

Fig. 5. Influence of an external magnetic field on the frequency shift of the Zeeman resonance peak АЛТ “Успех-4М”

Магнитный сдвиг частоты вершины первого зеемановского резонанса $m_F = \pm 1$ составил 0,2 Гц/Э, что соответствует коэффициенту экранирования 3 500 000.

Полученные значения коэффициентов магнитного экранирования очень высокие, что подтверждают обоснованность выбранной конструкции системы магнитного экранирования АЛТ «Успех-4М».

6. Заключение

Произведены численные расчеты коэффициента экранирования АЛТ «Успех-4М», которые позволили оценить максимальную эффективность экранирования в диапазоне от 11 000 000 при воздействии внешнего однородного поля $H_{\text{вн}} = 1$ Э до 2 000 000 при воздействии внешнего однородного поля $H_{\text{вн}} = 1$ Э. Полученные результаты показывают эффективность экранирования, достижимую при идеальных условиях, т. е. магнитная проницаемость экранов всегда однородна и максимальна, а также при армировании приборов не происходит деформации экранов. В производственном процессе добиться данных условий крайне сложно и поэтому в промышленных АЛТ «Успех-4М» эффективность экранирования ниже расчетных значений.

Результаты компьютерного моделирования показали, что в АЛТ «Успех-4М» необходимо усиление торцевой магнитной защиты из-за сложного распределения магнитного поля вдоль оси пролета атомного пучка.

Проведено исследование МСЧ АЛТ «Успех-4М» для выявления влияния эффективности экранирования используемой магнитной защиты на смещение частоты вершины зеемановского резонанса. Полученные данные позволяют оценить коэффициент магнитного экранирования на уровне 3 000 000 для бортовых АЛТ «Успех-4М». Полученные значения коэффициентов магнитного экранирования достаточно высокие, что говорит о правильном конструировании и технологическом исполнении систем магнитной защиты цезиевых АЛТ «Успех-4М».

Разумеется, для получения высоких значений коэффициентов экранирования всей системы необходимо использовать высококачественные материалы и добиваться тщательного соблюдения технологических режимов обработки.

Список литературы

1. Духина Н. Г., Мирющенко Н. И., Орехов А. А., Плешанов С. А., Ревенко К. В., Чугунов В. В. Системы магнитного экранирования прецизионных бортовых цезиевых АЛТ // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2020. Вып. 2 (545). С. 48—61.
2. Калябина И. А., Лагузов В. П., Рукман Г. И., Юхвидин Я. А. Физические принципы работы атомно-лучевого цезиевого стандарта частоты // Электроника (научно-технический сборник). 1959. № 6. С. 3—8.
3. Голеницкий И. И., Духина Н. Г., Мешков В. А., Плешанов С. А., Чугунов В. В. Анализ и оптимизация функциональных узлов цезиевых атомно-лучевых трубок методом компьютерного моделирования // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2012. Вып. 1 (512). С. 4—20.
4. Мясников Л. Л. Квантовая электроника на судах. Л. : Судостроение, 1966. 428 с.
5. Хромов А. В., Котов А. С., Ештокин В. Н., Левашов Н. И., Дюльгер В. Б., Кулачек Е. А., Захаров С. М., Плешанов С. А., Чугунов В. В. Результаты разработки радиоэлектронного блока для измерения частотных параметров атомно-лучевых трубок // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2013. Вып. 4 (519). С. 107—114.

Информация об авторах

Мирющенко Николай Игоревич, инженер-технолог 3 категории АО «НПП “Исток” им. Шокина», г. Фрязино, Московская область, Российская Федерация.

Духина Наталья Германовна, ведущий инженер АО «НПП “Исток” им. Шокина», г. Фрязино, Московская область, Российская Федерация.

Плешанов Сергей Анатольевич, начальник отдела АО «НПП “Исток” им. Шокина», г. Фрязино, Московская область, Российская Федерация.

Ревенко Константин Викторович, начальник лаборатории АО «НПП “Исток” им. Шокина», г. Фрязино, Московская область, Российская Федерация.

Чугунов Владимир Владимирович, ведущий инженер АО «НПП “Исток” им. Шокина», г. Фрязино, Московская область, Российская Федерация.

Агапов Антон Николаевич, инженер-технолог 3 категории АО «НПП “Исток” им. Шокина», г. Фрязино, Московская область, Российская Федерация.

Information about the authors

Nikolay I. Miryushchenko, process engineer 3 category, JSC «RPC “Istok” named after Shokin», Fryazino, Moscow Region, Russian Federation.

Natalia G. Dukhina, lead engineer, JSC «RPC “Istok” named after Shokin», Fryazino, Moscow Region, Russian Federation.

Sergey A. Pleshanov, head of department, JSC «RPC “Istok” named after Shokin», Fryazino, Moscow Region, Russian Federation.

Konstantin V. Revenko, head of laboratory, JSC «RPC “Istok” named after Shokin», Fryazino, Moscow Region, Russian Federation.

Vladimir V. Chugunov, lead engineer, JSC «RPC “Istok” named after Shokin», Fryazino, Moscow Region, Russian Federation.

Anton N. Agapov, process engineer 3 category, JSC «RPC “Istok” named after Shokin», Fryazino, Moscow Region, Russian Federation.