

## Автоматизированная система исследования нелинейных процессов в электровакуумных приборах с открытыми резонансными периодическими структурами

Г.С. Воробьев, А.И. Рубан, В.О. Журба, А.А. Рыбалко, Д.Ю. Дорошенко

Сумский государственный университет, ул. Римского-Корсакова, 2, 40007 Сумы, Украина

(Получено 18.10.2013; опубликовано online 06.04.2014)

В работе приведено описание экспериментальной установки и результаты исследований нелинейных процессов, возникающих при возбуждении электромагнитных колебаний электронным пучком в резонансных приборах типа оротрон – генератор дифракционного излучения. Данные приборы в настоящее время находят широкое применение в физике и технике СВЧ. Описана методика экспериментальных исследований, которая базируется на использовании универсальной электровакуумной установки – анализатора дифракционного излучения и микропроцессорной системы сбора и обработки данных. Приведены результаты экспериментальных исследований энергетических и частотных характеристик наиболее типичных режимов возбуждения колебаний в открытых резонансных системах типа оротрон. Даны рекомендации по реализации оптимальных режимов возбуждения колебаний в таких приборах.

**Ключевые слова:** Анализатор излучения, Гистерезисные явления, Генератор дифракционного излучения, Дифракционная решетка, Системы контроля информации, Электронный пучок.

PACS numbers: 84.40.Dc, 85.40.Bh

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных задач, возникающих при исследовании резонансных приборов типа оротрон – генератор дифракционного излучения (ГДИ) [1-3], является анализ нелинейных процессов, которые ограничивают КПД и мощность генерации, вызывают в энергетических и частотных характеристиках ряд нежелательных эффектов, в частности гистерезисные явления, асимметрию характеристик, ухудшение качества спектра СВЧ сигнала, которое определяется следующими факторами: нестабильностью и паразитной модуляцией источников питания, накоплением ионов и их последующими колебаниями, возбуждением в генераторе колебаний высших порядков, изменением в пространстве взаимодействия формы электронного пучка (ЭП) и др.

Не смотря на то, что к настоящему времени для таких приборов построены как линейная, так и основы нелинейной теории [1-4] введенные в них приближения не позволяют получить полное представление о физике нелинейных процессов в таких системах, что обусловлено громоздкостью численного анализа и эксперимента за счет многопараметровости исследуемых приборов. Поэтому вопросы автоматизации экспериментальных исследований нелинейных процессов формирования автоколебаний в открытых электродинамических системах типа оротрон – ГДИ остаются актуальными при их практической реализации в схемах устройств СВЧ. В данной работе описана универсальная экспериментальная установка, в которую внедрена микропроцессорная система, позволяющая контролировать различные режимы возбуждения электромагнитных колебаний миллиметрового диапазона волн в ГДИ, и приведены результаты исследований энергетических и частотных зависимостей, характерных для такого типа приборов, которые могут быть полезны при их проектировании и практической реализации.

### 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальная установка состоит из универсального макета – анализатора дифракционного излучения (АДИ), электромагнита, юстировочного устройства, вакуумной системы, блоков питания и стандартного волноводно-измерительного тракта миллиметрового диапазона волн.

Устройство АДИ, с расположением его относительно электромагнита, изображено на рисунке 1.

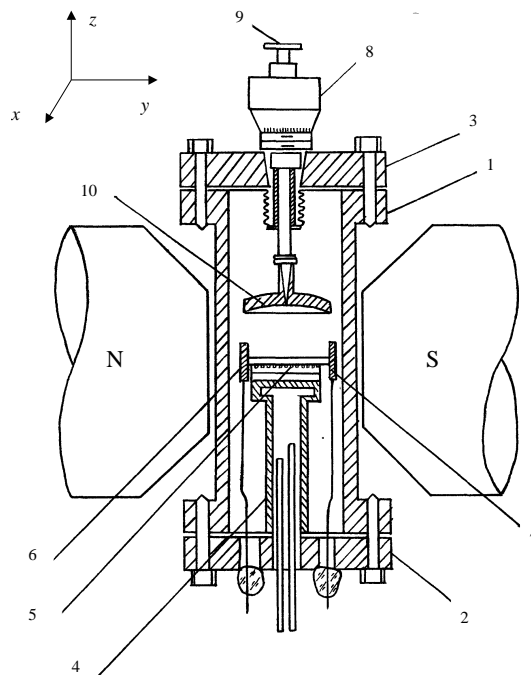


Рисунок 1 – Анализатор дифракционного излучения

Анализатор излучения состоит из следующих основных узлов: корпус 1, узел пушки 2, узел регистрации

излучения 3. Все элементы и узлы АДИ выполнены из немагнитных материалов. Внутри корпуса имеется цилиндрическая полость для размещения конструкций узла пушки и узла регистрации излучения, собранных на присоединительных фланцах. На задней стенке боковой поверхности корпуса имеется патрубок с присоединительным фланцем для подключения вакуумной системы. На передней стенке боковой поверхности корпуса расположено окно, служащее для визуальных наблюдений и фоторегистрации следа свечения ЭП в области электродинамической системы.

На фланце узла пушки размещены: пьедестал 4 с внутренней полостью для водяного охлаждения; нижнее зеркало электродинамической системы с заданным типом дифракционной решетки (ДР) 5; электронная пушка 6 и коллектор электронов 7.

Узел регистрации излучения имеет следующие элементы: микрометрический винт 8 с сильфоном, волноводный вывод энергии излучения 9 с присоединительным фланцем и верхнее зеркало 10 либо другую, регистрирующую излучение систему. Фланец 9 служит для присоединения стандартной измерительной аппаратуры миллиметрового диапазона волн.

На рисунке 2 показана принципиальная схема откачного поста экспериментальной установки. Макет АДИ через металлическое уплотнение подключен к измерительной камере, содержащей манометрические преобразователи РМ и РТ2.

Предварительная откачка объемов АДИ и магниторазрядного насоса NM до вакуума порядка  $5 \times 10^1$  Па осуществляется через систему клапанов VH1 и VH2 механическим насосом NL. При достижении требуемой степени вакуума клапаны VH1 и VH2 перекрываются, и включается магниторазрядный насос NM, обеспечивающий безмасляную откачку в объеме АДИ до степени вакуума  $10^5$ - $10^6$  Па.

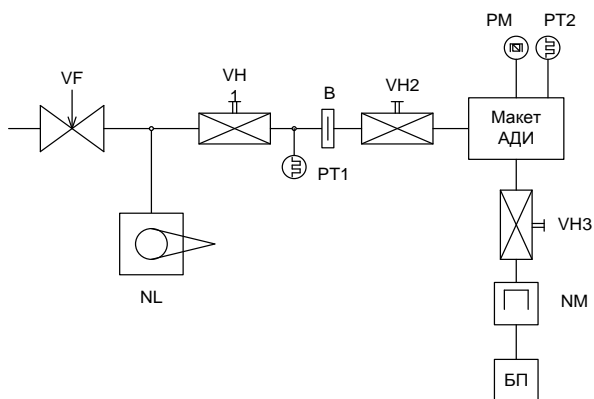


Рисунок 2 – Принципиальная схема откачного поста экспериментальной установки

Высоковакуумная часть установки с анализатором излучения установлена на юстировочном устройстве, позволяющем осуществлять перемещения макета по координатам  $x, z$  с точностью до  $\pm 10^5$  м и поворот вокруг оси  $y$  с точностью  $\pm 0,5$ . Если учесть, что магнитное поле является осесимметричным, то данная система юстировки позволяет решить задачу взаимной ориентации пучка и поля с достаточной точностью.

Данная конструкция АДИ позволяет исследовать различные типы электродинамических систем прибо-

ров дифракционной электроники при возбуждении их ЭП, что достигается путем замены зеркал, периодических структур, электронной пушки, введением дополнительных элементов: отражателя электронов, магнитных неоднородностей, рупорной антенны, системы типа дифракционная решетка – диэлектрический волновод, металлодиэлектрическая структура и т.д.

С целью ускорения и автоматизации процесса сбора информации предложено внедрить в данную экспериментальную установку микропроцессорную систему, блок схема которой представлена на рисунке 3.

Структура блоков первичного сбора и обработки данных (ПСОД) аналогична между собой и выполняет функции перевода аналоговых данных в цифровой вид для последующей их передачи и обработки в центральном блоке системы сбора и обработки данных (ССОД). Блоки ПСОД расположены непосредственно возле каждого аналогового прибора системы АДИ, что позволяет устранить влияние внешних помех на величину измеряемого параметра.

Основным узлом центрального блока управления системой является микроконтроллер архитектуры AVR. [5, 6] Рассмотрим основные преимущества структурной схемы и особенности функционирования предлагаемой ССОД.

1. На начальном этапе блоки ПСОД преобразуют аналоговый сигнал индикатора в нормированный, в пределах от 1 до 5 В, который, при помощи 10 битного АЦП, преобразуется в цифровой код.

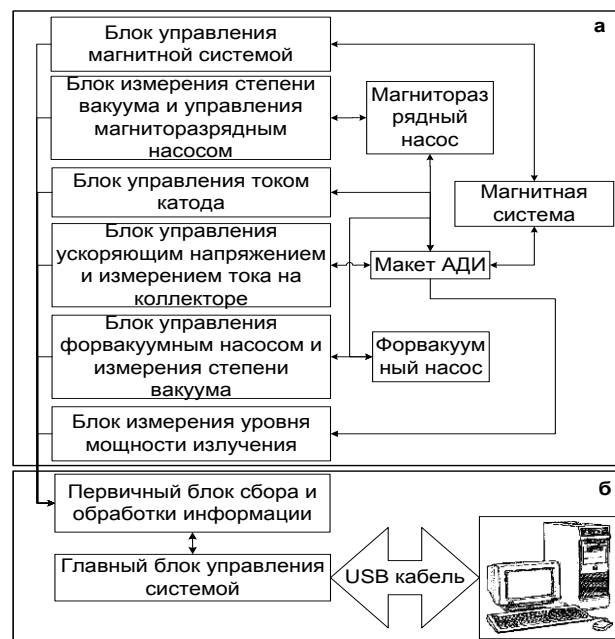


Рисунок 3 – Блок-схема экспериментальной установки с внедренной ССОД: экспериментальная установка на базе электронного пучка (а), микропроцессорная система сбора и обработки данных (б)

2. Центральный блок управления микропроцессорной ССОД выполняет такие основные функции:

– опрос блоков ПСОД, который заключается в подаче управляющего сигнала на микроконтроллер первичного блока, после чего этот блок начинает прием, обработку и передачу данных в центральный блок управления;

- циклическое измерение в течение малого промежутка времени одного параметра и расчет его среднего значения для более точного проведения измерений;
- индикацию обработанного значения одного из параметров измерения или сигнализацию при выходе параметра за установленные пределы;
- передачу данных на персональный компьютер с использованием протокола шины USB.

3. Алгоритм работы центрального блока представлен на рисунке 4. После подачи сигнала управления в блоки ПСОД и преобразования значений аналогового индикатора в цифровой вид происходит его передача в центральный блок.



Рисунок 4 – Алгоритм работы микропроцессорной системы

При запуске измерительной системы, на первом этапе, производится подключение системы к сети и установка связи между центральным и периферийными блоками. При условии удачной установки связи на экране центрального блока отображается последовательно пять полей, характеризующие сигналы с датчиков, и значение частоты опроса датчиков в миллисекундах. Если экран центрального блока пуст, то необходимо проверить правильность подключения датчиков первичного сбора и обработки данных и перезапустить систему. Подключение ПСОД в цепь аналоговых преобразователей проводится последовательно, в случае измерения тока накала катода, и параллельно для остальных 4-х каналов, соблюдая полярность при подключении к аналоговым преобразователям. Далее, производится подключение центрального блока к ПК USB шнуром и запуск программы на ПК.

После включения исследуемой системы, на датчики ПСОД при показаниях на аналоговых приборах постоянно подается значение тока или напряжения. Для снятия показаний с аналоговых преобразователей центральный блок последовательно подает сигналы на датчики ПСОД с частотой 500 мс, 250 мс и 125 мс, которую можно регулировать вручную с панели центрального блока. При снятии аналогового сигнала, для снижения погрешности измерений, датчик ПСОД производит 10 замеров и передает усредненное значение в центральный блок. Центральный блок производит вывод на экран усредненного значения, а затем передачу данного значения в оперативную память ОЗУ ПК. После запуска программы на ПК происходит сканирование USB портов и определение

нового устройства. Для систем Windows XP 7/8 автоматически устанавливается драйвер и USB порт, к которому подключен центральный блок ССОД, переопределяется в виртуальный СОМ-порт. После чего следует нажать кнопку «Connect» для установки связи ПК с системой сбора и обработки данных. В случае удачного соединения в диалоговом окне отображаются данные с датчиков ПСОД. После проведения измерений необходимо сохранить полученные данные на жестком диске ПК.

В предложенном устройстве центральный блок собрав данные с блоков ПСОД анализирует их и переводит в десятичную систему, после чего передает обработанные данные на компьютер. На цифровом индикаторе центрального блока отображаются данные полученные с аналоговых приборов. Частота и способ отображения изменяются кнопкой регулировки на корпусе центрального блока.

Данная ССОД позволяет при измерении одного из параметров макета ГДИ получать значения всех остальных показателей в текущий момент времени. Это, в свою очередь, упрощает методику проведения эксперимента и сокращает время серии экспериментов конкретной модификации ГДИ. Для получения и обработки данных на персональном компьютере используется программное обеспечение, написанное на языке C++.

Предложенная система позволяет повысить точность измерения параметров АДИ и контролировать физические процессы, происходящие в исследуемом приборе. Усовершенствовать данную систему можно путем включения в нее пошаговых двигателей, что позволит автоматически контролировать накал катода, ускоряющее напряжение, магнитное поле, степень вакуума в системе и другие электрофизические параметры.

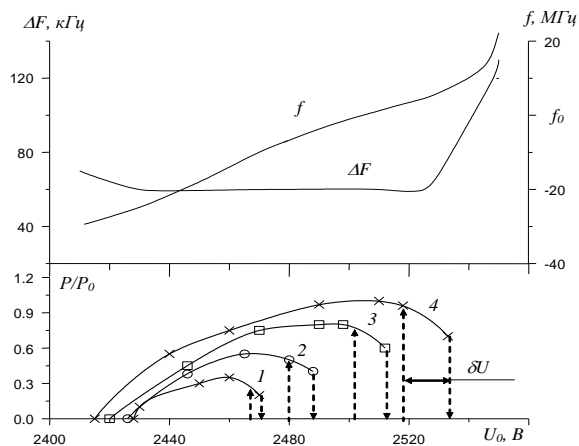
### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Остановимся на результатах тестовых экспериментальных исследований одночастотного и многочастотного режимов возбуждения колебаний в макете ГДИ четырехмиллиметрового диапазона длин волн со сфероидальным и сфероцилиндрическим открытыми резонаторами, полученных на установке, описанной в разделе 2, для автоматического режима сбора и обработки информации. Радиус кривизны сферических зеркал составлял  $R = 110$  мм, апертура зеркал – 55 мм. Электронный поток сечением  $0,2 \times 5$  мм<sup>2</sup> формировался диодной электронной пушкой и фокусировался постоянным полем электромагнита. Щель связи размером  $0,05 \times 3,6$  мм<sup>2</sup> располагалась в центре сферического зеркала и обеспечивала минимальное влияние нагрузки на характеристики генератора. Условия возбуждения ГДИ в одночастотном или же многочастотном режимах определялись путем исследования спектров колебаний, используемых в эксперименте открытых резонаторов при изменении расстояния между зеркалами  $H$ , а различная сгущенность спектра для заданного интервала  $H$  достигалась вариацией размеров зеркал  $L$  и ДР по оси пучка.

В процессе экспериментальных исследований одночастотного режима возбуждения ГДИ установлено,

что изменение мощности, крутизна электронной перестройки частоты, ширины спектральной линии СВЧ сигнала и степень проявления гистерезисных эффектов определяются протяженностью области пространства взаимодействия и типом возбуждаемого колебания, соотношением между рабочим ( $I$ ) и пусковым ( $I_n$ ) токами, величиной магнитного поля и другими факторами. Характерной особенностью таких колебаний ГДИ в зоне электронной перестройки является асимметрия энергетических и частотных зависимостей относительно точки максимальной мощности ( $P_0$ ). При этом для большинства колебаний в длинноволновой области зоны генерации наблюдается плавное нарастание мощности с увеличением напряжения  $U_0$  (мягкий режим возбуждения генератора), а в коротковолновой – резкий срыв колебаний (жесткий режим генерации), где обычно проявляются гистерезисные явления. Ширина зоны генерации ( $\Delta U_0$ ) и гистерезисной петли ( $\delta U$ ) зависят от длины волны возбуждаемых колебаний и соотношения  $I/I_n$ . Для большинства колебаний при токах  $I = (1,1 - 1,2) \times I_n$  наблюдается слабое проявление гистерезисных эффектов. С ростом электронного тока увеличивается интервал  $\Delta U_0$  и абсолютное значение ширины петли гистерезиса. Крутизна электронной перестройки частоты колебаний незначительно зависит от величины тока пучка и в пределах зоны генерации имеет, в основном, линейный характер.

Наблюдаемые на рисунке 5 асимметрия зоны генерации и гистерезисные эффекты непосредственно связаны с нелинейными процессами протекающими в приборах с длительным взаимодействием [7, 8].



**Рисунок 5** – Характеристики ГДИ в одночастотном режиме возбуждения колебаний, полученные с применением системы ПСОД

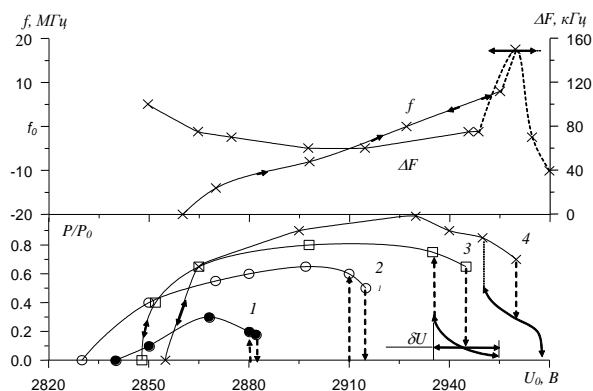
В начале, при увеличении рассинхронизма скоростей волны и ЭП, значение отдаваемой электронами мощности возрастает по мере движения их в тормозящей фазе поля ОР вплоть до максимального значения его амплитуды (максимум мощности по  $U_0$ ). Однако дальнейшее возрастание  $U_0$  приводит к тому, что все большая часть электронов поступает в резонатор в ускоряющую фазу поля и начинает отбирать в нем энергию. Поэтому, при незначительном увеличении скорости ЭП отдаваемая замедленными электронами энергия становится меньше энергии заключенной в

ОР, что приводит к срыву колебания. Для данного колебания существуют два предельных параметра рассинхронизма, определяющих ширину зоны генерации. В длинноволновой области колебаний эти значения для линейного и нелинейного режимов совпадают, а в коротковолновой области для линейного режима предельное значение параметра рассинхронизма значительно больше, что приводит к асимметрии зоны генерации при  $I > 1,2 \times I_n$ . Наличие электронного гистерезиса обусловлено уменьшением средней скорости электронов в процессе взаимодействия их с полем ОР.

Возможность возбуждения ГДИ в многочастотном режиме определяется как геометрическими параметрами электродинамической системы, так и электрическими, в частности, величиной  $I/I_n$ . Путем изменения параметра  $I/I_n$ , расстояния между зеркалами и размеров их по оси пучка электронов можно получать различную сгущенность спектра колебаний и выделить одночастотный и многочастотный режимы возбуждения ГДИ. В частности, для исследуемой электродинамической системы, при  $L = 30$  мм, наибольшая вероятность возбуждения высших типов колебаний, близких по частоте генерации и ускоряющему напряжению к основному, существовала в коротковолновой области спектра открытого резонатора ( $f_0 = 77-80$  ГГц) для  $H/R = 0,14-0,23$ , а с увеличением  $L$ , это явление наблюдалось и в диапазоне  $f_0 = 74-77$  ГГц при  $H/R = 0,23-0,3$ . Проведенные экспериментальные исследования показали, что если в резонаторе возбуждаются два близких по частоте колебания: основное – на частоте  $f_0$  и конкурирующее на частоте  $f_1 = f_0 + 20$  МГц. Из графиков видно, что для токов пучка  $I < 2 \times I_n$  характеристики генератора практически не отличаются от зависимостей, приведенных на рисунке 5, т. е. при этих токах паразитное колебание полностью подавляется основным. Однако для токов  $I > 2 \times I_n$  начинает проявляться обратный процесс – подавление основного колебания паразитным.

В этом случае в длинноволновой области зоны наблюдается смещение точки начала генерации к  $U_0$ , соответствующему возбуждению генератора в линейном режиме и более быстрый рост мощности колебания с возможностью возникновения жесткого режима возбуждения ГДИ при появлении конкурирующего низкочастотного колебания. В коротковолновой области срыв генерации основного колебания происходит до уровня мощности паразитного колебания. При этом вблизи скачка мощности, где пусковой ток основного колебания выше паразитного, наблюдается значительное уширение спектра колебаний  $\Delta F$ . Отметим, что в случае, показанном на рисунке 6, гистерезис по мощности сопровождается затягиванием частоты основного колебания паразитным.

Возникновение контурного гистерезиса в ГДИ обусловлено нелинейным взаимодействием ЭП с СВЧ



**Рисунок 6** – Характеристики ГДИ при наличии конкурирующих колебаний, полученные с применением системы ПСОД

полем ОР двух типов колебаний, близких по частоте и амплитуде. В отличие от электронного гистерезиса, контурный гистерезис является результатом конкуренции рабочего и паразитного видов колебаний, имеющей место при перекрытии зон генерации этих колебаний. Приведенные выше характеристики ГДИ коррелируют с аналогичными зависимостями, полу-

ченными в ручном режиме сбора и обработки информации [8], что свидетельствует об эффективности предложенной системы автоматизации установки.

#### 4. ВЫВОДЫ

В работе предложена и реализована экспериментальная установка по анализу характеристик приборов типа оротрон – ГДИ, в которую внедрена микропроцессорная система сбора и обработки информации.

Описанный блок – схема экспериментальной установки и ее алгоритм работы, позволяющие оптимизировать процесс сбора и обработки информации.

Приведены результаты экспериментальных тестовых исследований основных характеристик приборов типа оротрон – ГДИ, которые коррелируют с ранее полученными экспериментальными данными в режиме ручного сбора информации, что подтверждает работоспособность предложенной системы автоматизации.

В результате полученных на установке экспериментальных данных определена область электрофизических параметров, позволяющая реализовать в приборах типа оротрон – ГДИ одночастотный режим колебаний, который является наиболее оптимальным.

### Автоматизация системи дослідження нелінійних процесів в електровакуумних приладах з відкритими резонансними періодичними структурами

Г.С. Воробйов, А.І. Рубан, В.О. Журба, О.О. Рибалко, Д.Ю. Дорошенко

*Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, 40007 Суми, Україна*

У роботі наведено опис експериментальної установки та результати досліджень нелінійних процесів, що виникають при збудженні електромагнітних коливань електронним пучком у резонансних приладах типу оротрон - генератор дифракційного випромінювання. Дані прилади в теперішній час знаходять широке застосування у фізиці і техніці НВЧ. Описана методика експериментальних досліджень, яка базується на використанні універсальної електровакуумної установки - аналізатора дифракційного випромінювання і мікропроцесорної системи збору та обробки даних. Наведені результати експериментальних досліджень енергетичних і частотних характеристик найбільш типових режимів збудження коливань у відкритих резонансних системах типу оротрон. Надані рекомендації з реалізації оптимальних режимів збудження коливань в таких приладах.

**Ключові слова:** Аналізатор випромінювання, Гістерезисні явища, Генератор дифракційного випромінювання, Дифракційна решітка, Системи контролю інформації, Електронний пучок.

### Automated System of Study Nonlinear Processes in Electro-vacuum Devices with Open Resonant Periodic Structures

G.S. Vorobyov, A.I. Ruban, V.O. Zhurba, A.A. Rybalko, D.Y. Doroshenko

*Sumy State University, 2, Rymsky-Korsakov St., 40007, Sumy, Ukraine*

The article describes the experimental equipment and the results of investigations of nonlinear processes occurring during the excitation of electromagnetic oscillations in the resonant electron beam devices such as an orotron-generator of diffraction radiation. These devices are finding wide application in physics and microwave technology, now. A technique for experimental research, which bases on the using of the universal electro vacuum equipment diffraction radiation analyzer and the microprocessor system for collecting and processing data. The experimental investigations results of the energy and frequency characteristics for the most common modes of the excitation oscillations in the open resonant systems such as an orotron. The implementations on the optimum modes for the oscillations excitation in such devices were recommended.

**Keywords:** Analyzer of radiation, Hysteresis phenomena, The diffraction of radiation, Diffraction grating, System control information, Electron beam.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Генераторы дифракционного излучения* (Ред. В.П. Шестопапов) (Киев: Наук. Думка: 1991).
2. *Вакуумная СВЧ электроника: Сборник обзоров* (Ред. М.И. Петелин) (Нижний Новгород: Институт прикладной физики РАН: 2002).
3. *Электровакуумные приборы диапазона миллиметровых волн* (Ред. Л.В. Касаткин, В.П. Рукин, В.Д. Ерёмка и др.) (Севастополь: Вебер: 2007).
4. А.А. Шматько *Электронно волновые системы миллиметрового диапазона* (Харьков: ХНУ им. В.Н. Каразина: 2008).
5. В.С. Яценков, *Микроконтроллеры Microchip с аппаратной поддержкой USB* (Санкт-Петербург: Горячая Линия: 2008).
6. Джон Мортон, *Микроконтроллеры AVR* (Москва: Додэка XXI: 2006).
7. О.Г. Верин, *Электроника СВЧ* 21, No10 21-32 (1977).
8. Г.С. Воробьев, А.И. Цвык, *Экспериментальное исследование гистерезисных явлений в генераторе дифракционного излучения* 25 No9 1060 (1982).