

УДК 621.38; 681.5

## МАЛОГАБАРИТНЫЙ РЕНТГЕНОВСКИЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ С СИСТЕМОЙ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

<sup>1)</sup>Красовский Т. А., <sup>2)</sup>Василенко В. И.

<sup>1)</sup>Физико-технический учебно-научный центр НАН Украины, г. Киев, Украина

<sup>2)</sup>Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, г. Киев, Украина

Разработан малогабаритный рентгеновский излучатель, выполненный в виде моноблока, в котором встроены острофокусная рентгеновская трубка типа 0,012BX9, двухканальная прецизионная система электропитания и управляющий микропроцессорный контроллер, связанный с персональным компьютером. Один канал системы – квазирезонансный преобразователь напряжения питания +15 В в стабилизированное напряжение 0...-50 кВ на катоде трубки. Второй канал стабилизирует ток эмиссии, который можно регулировать в пределах 0...200 мкА, независимо от напряжения на катоде. Оба канала защищены от высоковольтных пробоев и коротких замыканий. Обеспечен компьютерный мониторинг всех электрических параметров прибора. Габариты блока 200x100x80 мм. Излучатель предназначен для работы в составе рентгенофлуоресцентного анализатора, но может использоваться также для рентгенодефектоскопии, рентгенодиагностики, рентгенотерапии.

**Ключевые слова:** рентгеновская трубка, ток эмиссии, напряжение, контроллер.

### Введение

Малогабаритный рентгеновский излучатель предназначен для использования в составе аппаратуры для спектроскопического исследования элементного состава веществ методами рентгенофлуоресцентного, рентгеноспектрального или рентгеноструктурного анализа, основанными на сборе и последующем анализе спектра, полученного путем воздействия на исследуемый материал рентгеновским излучением. Излучатель может использоваться также для рентгенодефектоскопии, рентгенодиагностики, рентгенотерапии.

В качестве источника излучения в данной работе служит острофокусная рентгеновская трубка (РТ) типа 0,012BX9. Для анализа различных групп элементов используют соответствующие значения тока эмиссии и напряжения на аноде трубки. Для исследования легких элементов вполне достаточно 10 кВ, для средних – 10-30 кВ, для тяжелых – 40-50 кВ. Фотоны из исследуемого вещества, вызванные рентгеновским излучением, регистрируются специальным детектором, разрешение которого определяет точность измерений.

### Постановка задачи

При разработке системы питания РТ решались следующие задачи:

- Генерация высокого постоянного напряжения с глубокой регулировкой и прецизионной стабильностью в диапазоне 5...50 кВ, +/- 0,01%.
- Обеспечение электрической прочности высокопотенциальных элементов не менее 70 кВ.
- Независимая от анодного напряжения регулировка тока трубки в пределах 40...200 мкА с погрешностью не более 0,01%.

- Комплексное управление и контроль всех параметров системы питания с помощью персонального компьютера (ПК).
- Минимизация помех от преобразователей, влияющих на работу детектора.
- Оптимизация соотношения массогабаритные показатели / цена.

### Устройство и работа прибора

Принципиальная схема излучателя с системой питания представлена на рис. 1. Схема содержит два канала. Верхний (по схеме) – канал регулирования и стабилизации тока эмиссии РТ, нижний – напряжения на катоде.

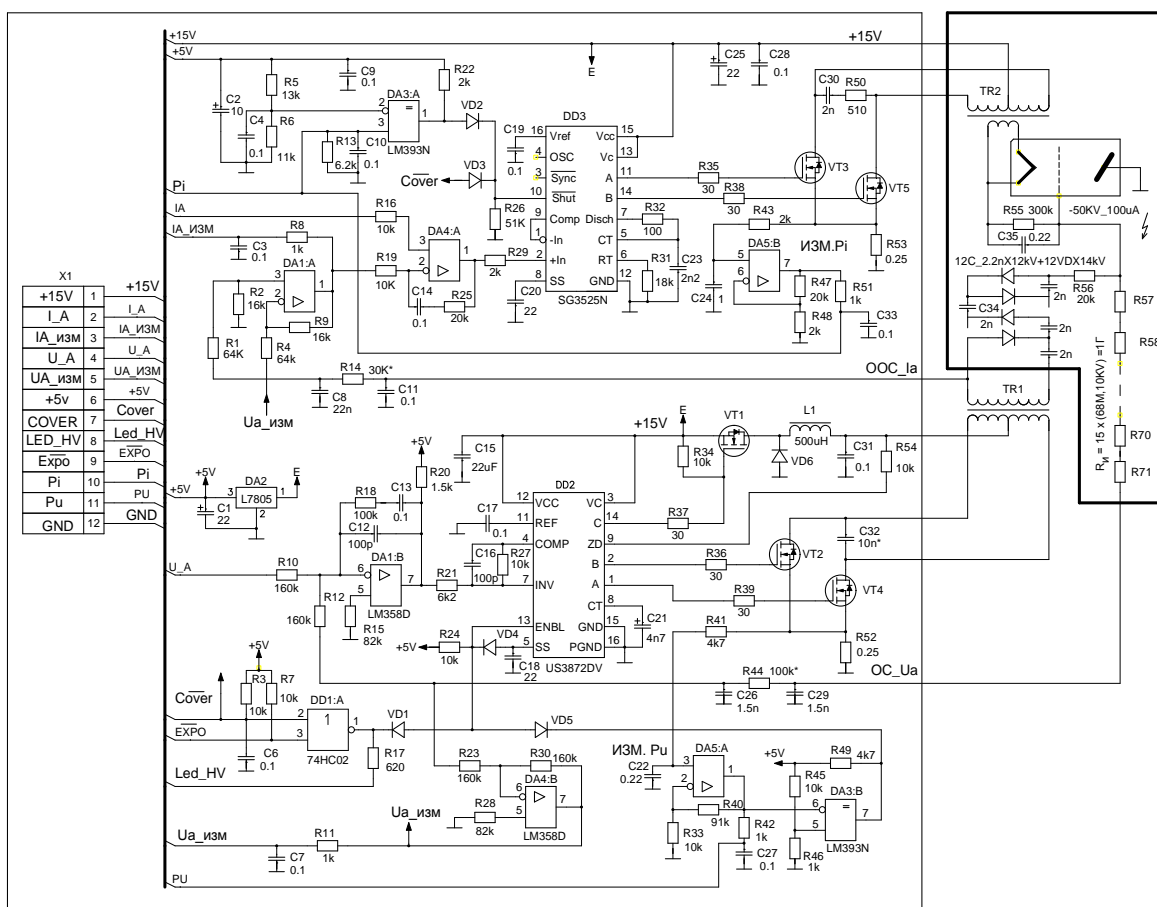


Рис. 1. Принципиальная схема рентгеновского излучателя с системой питания

Для создания постоянного напряжения 50 кВ с минимальным уровнем излучаемых электромагнитных помех применена схема квазирезонансного DC-DC преобразователя на основе ш.и.м. - контроллера UC2872 (DD2). Эта микросхема специально создана для управления резонансными преобразователями выпрямленного и сглаженного напряжения сети в высокочастотный ток лампы дневного света, но может с успехом использоваться и для прецизионного регулирования выходных параметров вторичных источников питания [1, 2, 3].

Контроллер DD2 имеет три выхода – A, B и C. На выходах A, B вырабаты-

ваются прямоугольные парафазные импульсы со скважностью 2 (меандр), которые поочередно отпирают транзисторы  $VT_2$ ,  $VT_4$  двухтактного усилителя мощности. Нагрузкой усилителя служит повышающий трансформатор  $TR_1$ . Индуктивность рассеяния трансформатора вместе с ёмкостью конденсатора  $C_{32}$  и межвитковой ёмкостью вторичной обмотки образуют параллельный колебательный контур, в котором форма колебаний близка к синусоиде. Питание усилителя мощности осуществляется от регулируемого источника тока, образованного импульсным понижающим стабилизатором на транзисторе  $VT_1$  и дросселе  $L_1$ . Транзистор  $VT_1$  управляется отрицательными импульсами с выхода  $C-DD_2$ . Длительность этих импульсов определяется сигналом, поступающим на инвертирующий вход  $DD_2$  с усилителя ошибки  $DA1B$ .

Стабилизатор преобразует постоянное напряжение  $+15$  В в регулируемый ток питания усилителя мощности. По сути – это чоппер, на выходе которого после дросселя  $L_1$  отсутствует фильтрующий конденсатор большой ёмкости. Этим обеспечивается высокое внутреннее сопротивление источника для переменной составляющей тока. Поскольку нагрузка усилителя мощности имеет характер параллельного колебательного контура, ток питания в оба полупериода идентичен. Поэтому источник тока должен давать в каждом полупериоде одинаковую порцию энергии, т. е. работать на удвоенной резонансной частоте. Для этого переменное напряжение со средней точки первичной обмотки  $TR_1$  подается через резистор  $R_{54}$  на вход  $ZD$  синхронизации контроллера  $DD_2$ .

Максимальная амплитуда напряжения на вторичной обмотке трансформатора достигает  $4,5$  кВ, частота  $40...50$  кГц. Это напряжение питает 12-кратный множитель-выпрямитель, который фактически является источником постоянного напряжения  $10...50$  кВ. Его отрицательный полюс подключен к катоду  $PT$  и к цепочке резисторов  $R_{и} = R_{57} + \dots + R_{71}$ , служащих для измерения уровня высокого напряжения и для создания сигнала отрицательной обратной связи по напряжению на катоде. Положительный полюс этого источника через резисторы  $R_{14}$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  подключен к общему проводу (к «земле»), поэтому через них проходят в положительном направлении анодный ток  $PT$  и ток в измерительных резисторах  $R_{и}$ , т. е. суммарный ток  $I_{\Sigma} = I_{PT} + I_{R_{и}}$ . Максимальное значение этого тока  $I_{\Sigma \max} = 200 + 50 = 250$  мкА.

Отрицательный ток на выходе из цепочки резисторов  $R_{и}$  разделён на две равные части:

а) через резистор  $R_{23}$  – на инвертирующий вход усилителя  $DA4B$ . Выходное положительное напряжение с усилителя ( $U_{\text{Аизм}} = 0...+4,096$  В), пропорциональное отрицательному напряжению на катоде  $PT$ , поступает через разъем  $5-X1$  в управляющий микропроцессорный контроллер (на схеме не показан) и далее в ПК для измерения и индикации текущего значения анодного напряжения. Напряжение  $U_{\text{Аизм}}$  используется также в канале измерения и стабилизации тока  $PT$ ;

б) через резистор  $R_{12}$  – на инвертирующий вход усилителя ошибки  $DA1B$ , который представляет собой ПИ-регулятор. На этот же вход поступает с управ-

ляющего микропроцессорного контроллера сигнал  $U_A$ , задающий уровень напряжения на катоде РТ.

Для оценки выходной мощности этого канала, а также для защиты транзисторов  $VT2$ ,  $VT4$  от перегрузки по току при случайных пробоях высокого напряжения служит схема, состоящая из датчика тока  $R52$ , фильтра  $R41$ ,  $C22$ , усилителя  $DA5A$  и компаратора  $DA3B$ . В момент пробоя высокого напряжения резко возрастают ток транзисторов  $VT2$ ,  $VT4$  и напряжение на  $R52$ . При этом выходное напряжение компаратора  $DA3B$  скачкообразно уменьшается до нуля и через диод  $VD5$  запирает контроллер  $DD2$ . Сигнал  $P_U$  с выхода  $DA5A$ , пропорциональный току нагрузки, поступает через разъем 11-Х1 в ПК для индикации.

Рентгеновская трубка, представляющая собой вакуумный прибор (диод или триод) с заземленным анодом, имеет классическую зависимость тока эмиссии от тока накала. Регулировка тока эмиссии возможна: в случае диодного варианта – с помощью тока накала (на линейном участке ВАХ), в триодном варианте – изменением сеточного потенциала. В нашей работе использован первый вариант. Канал регулирования и стабилизации тока эмиссии РТ содержит дифференциальный усилитель  $DA1A$ , усилитель ошибки  $DA4A$ , ш.и.м.-контроллер  $DD3$ , двухтактный усилитель мощности на транзисторах  $VT3$ ,  $VT5$ , трансформатор  $TR2$ , а также усилитель  $DA5B$  напряжения на датчике тока  $R53$  (аналогично  $DA5A$ ). На неинвертирующий вход  $DA4A$  подается с разъема 2-Х1 от 12-разрядного ЦАП напряжение " $I_A$ " = 0...+4,096 В, задающее силу анодного тока РТ. Сигнал отрицательной обратной связи на инвертирующем входе  $DA4A$  создается с помощью дифференциального усилителя  $DA1A$ . Напряжения на резисторах  $R1$ ,  $R2$  (т. е. на суммирующем входе дифференциального усилителя)

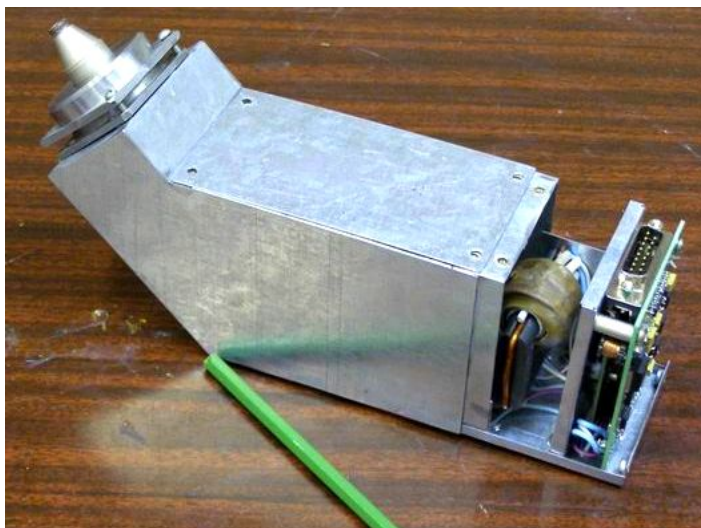


Рис. 2. Внешний вид прибора

$U_+ = U_1 + U_2$ , где  $U_1 = (R1 + R2) \cdot I_{РТ}$ ,  $U_2 = (R1 + R2) \cdot I_{Ри}$ . Резисторы  $R1$ ,  $R2$  выбраны так, что  $U_2 = U_{A\_изм}$ . Для того, чтобы устранить влияние напряжения на катоде РТ на ток эмиссии, на вычитающий вход дифференциального усилителя подается напряжение  $U_{A\_изм}$ , поэтому напряжение на выходе  $DA1A$   $U_{оос} \approx "I_A"$ .

Сигнал  $P_i$  с выхода  $DA5B$  поступает в ПК для оценки мощности, расходуемой в этом канале. Кроме того, сигнал  $P_i$  подается также на неинвертирующий вход компаратора  $DA3A$ . В случае перегрузки транзисторов  $VT3$ ,  $VT5$  по току, на выходе компаратора возникает напряжение +5 В (логическая единица), которое через диод  $VD2$  запирает ш.и.м. - контроллер  $DD3$ .

Работа системы питания возможна только при закрытом защитном кожухе, когда сигнал  $Cover=0$ . Включение прибора производится подачей сигнала  $Expo=0$  на вход логической микросхемы DD1A (2ИЛИ-НЕ). При этом на ее выходе появляется сигнал  $Led\_HV$ , который зажигает сигнальный светодиод на передней панели прибора.

Внешний вид прибора (полуоткрытого) показан на рис. 2.

Благодаря использованным схемотехническим решениям получены следующие технические характеристики:

Напряжение питания, В	15 $\pm$ 10%,
Ток потребления (макс.), А	1,5,
Напряжение на катоде, кВ	-3...-60,
Максимальный ток эмиссии, мкА	200 ,
К. п. д., %	75,
Пульсации напряжения на катоде, мВ.	200,
Нестабильность напряжения на катоде, %	
при изменении тока анода 0...200 мкА	0,05,
при изменении напряжения на катоде на $\pm$ , - 10%	0,01,
Дрейф напряжения на катоде при изменении температуры окружающей среды 0...40 С	$\pm$ -200 ppm/ °С,
долговременный дрейф	$\pm$ -250 ppm/ °С,
Габариты, мм	200x100x80,
Вес, г	400

Представленный рентгеновский излучатель применяется в различных модификациях рентгенофлуоресцентных анализаторов *EXPERT MOBILE* от НПП ИНАМ г. Киев, или в спектрометрах *ElvaX* фирмы ЭЛВАТЕХ г. Киев [4, 5].

## Выводы

Разработан и создан малогабаритный рентгеновский излучатель с системой электропитания, в которой прецизионное регулирование уровней напряжения на катоде и тока эмиссии рентгеновской трубки осуществляется независимо друг от друга и дистанционно, с возможностью их измерения интегрированной микропроцессорной системой мониторинга всех электрических параметров. Обеспечена защита от перегрузок и коротких замыканий.

## Литература

1. [www.ti.com/lit/ds/symlink/uc3872.pdf](http://www.ti.com/lit/ds/symlink/uc3872.pdf)
2. [www.ti.com/lit/pdf/slva056](http://www.ti.com/lit/pdf/slva056)
3. Черепин В. Т. Блок питания дуоплазматрона / В. Т. Черепин, Т. А. Красовский, В. И. Василенко // ПТЭ. – 2014. – № 5. – С. 139 – 140.
4. [www.inam.kiev.ua](http://www.inam.kiev.ua)
5. [www.elvatech.com/ru](http://www.elvatech.com/ru)

Надійшла до редакції  
05 квітня 2015 року

© Красовский Т. А., Василенко В. И., 2015