

# 300 кВ/ 15 кВт прецизионный источник питания инжектора электронов

Р.В. Воскобойников, В.В. Колмогоров, А.С. Медведко, М.А. Щеглов  
Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия

Существенный прогресс в области создания полупроводниковых элементов позволяет при относительно малых трудозатратах проектировать компактные и экономичные источники высоковольтного питания, имеющие высокую стабильность выходного напряжения. В статье описывается разработанный, изготовленный и введенный в эксплуатацию источник высоковольтного питания электронной трубки инжектора микротрона-рекуператора, создаваемого в БИЯФ СО РАН. Источник имеет регулируемое выходное напряжение от -30 кВ до -300 кВ и выходную мощность до 15 кВт. Достигнуты долговременная стабильность выходного напряжения и уровень пульсаций в режиме номинальной мощности не более  $\pm 0.1\%$ .

## 1. Функциональная схема источника питания электронных трубок

На рис.1 показана функциональная схема источника питания электронных трубок (ИПЭТ). Основными элементами ИПЭТ являются: 1 – высоковольтная часть, 2 – генератор переменного напряжения частотой 500 Гц, 3 – система управления и контроля высоковольтного выпрямителя, 4 – дополнительный выпрямитель последовательного стабилизатора, 5 – генератор переменного напряжения частотой 40 кГц, 6 – система управления и контроля стабилизатора, 7 и 8 – входные выпрямители. Отличительной особенностью данного источника питания является наличие дополнительного последовательного стабилизатора, предназначенного для уменьшения пульсаций выходного напряжения.

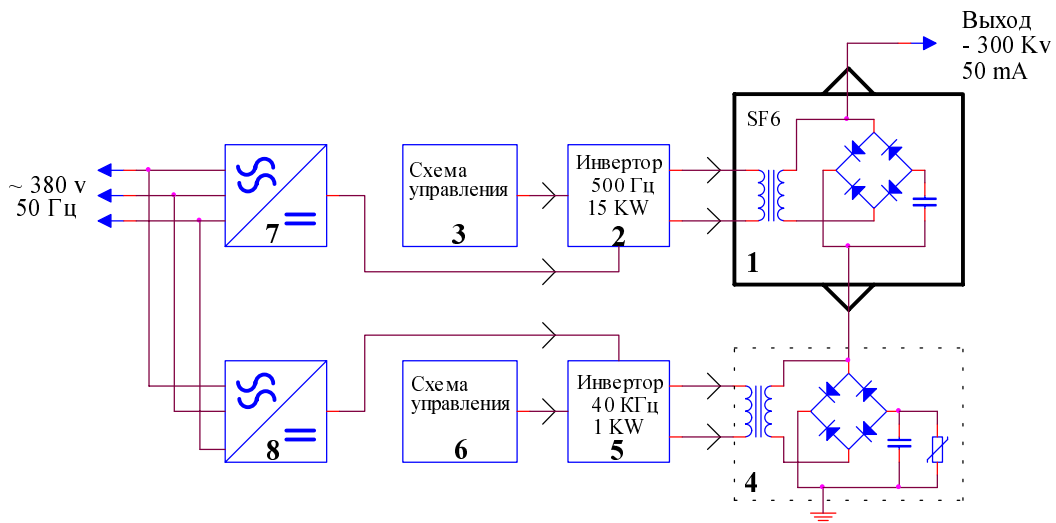


Рис. 1. Функциональная схема источника питания электронных трубок.

## 2. Высоковольтная часть источника питания электронных трубок

На рис.2 показана функциональная схема высоковольтной части ИПЭТ.

Высоковольтная часть источника представляет собой секционированный трансформатор - выпрямитель и состоит из тринадцати последовательно соединённых выпрямительных секций. Каждая секция включает в себя вторичную обмотку высоковольтного трансформатора и диодный выпрямитель с емкостным фильтром. Диодный выпрямитель собран по схеме с удвоением напряжения из лавинных диодов, а емкостной фильтр – из керамических высоковольтных конденсаторов. Первичная обмотка трансформатора и выпрямительные секции помещены в сосуд с изолирующим газом SF<sub>6</sub>, имеющим избыточное давление 0.7 Атм.

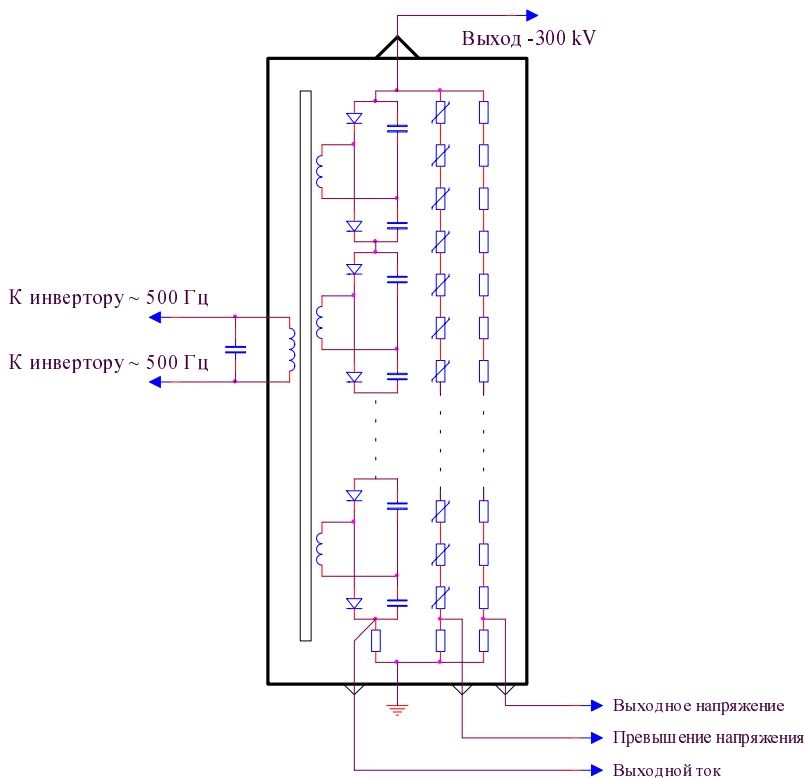


Рис. 2. Функциональная схема высоковольтной части источника питания электронных трубок.

образом, инвертор работает в резонансном режиме, формируя синусоидальное напряжение частотой 500 Гц регулируемой амплитуды. На рис.3 показана функциональная схема системы питания высоковольтного выпрямителя.

Система питания высоковольтного выпрямителя состоит из четырех основных модулей: входного диодного выпрямителя с коммутационной аппаратурой 1, LC-фильтра 2, IGBT-инвертора 3 и выходного резонансного контура 4. Схема управления и стабилизации конструктивно совмещена с силовой частью IGBT-инвертора. Система управления включает в себя быстродействующую систему защиты от перенапряжений, высоковольтных пробоев, превышения тока относительно номинального и систему блокировок.

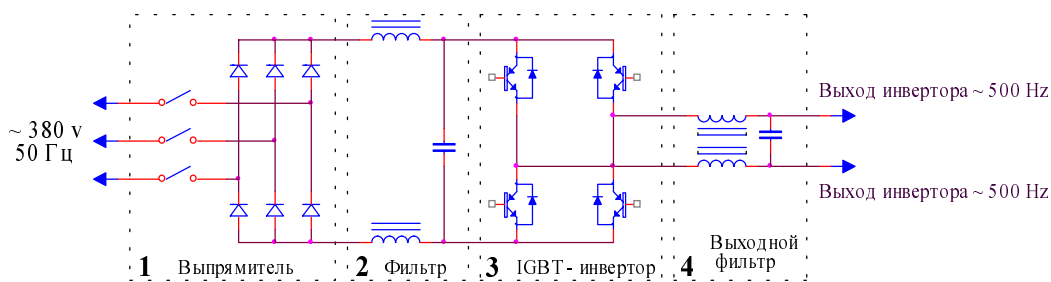


Рис. 3. Функциональная схема системы питания высоковольтного выпрямителя.

#### 4. Дополнительный последовательный стабилизатор выходного напряжения

Функциональная схема дополнительного стабилизатора выходного напряжения идентична схеме основного источника высоковольтного питания, существенным отличием являются значительно меньшая выходная мощность (меньше 1 кВт) и сравнительно высокая частота преобразования – 40 кГц. Для достижения уровня пульсаций ниже 0.1% достаточен петлевой коэффициент усиления менее 40 дБ. Амплитуда выходного напряжения дополнительного стабилизатора напряжения достигает 15 кВ при подавлении основной гармоники (1 кГц) выпрямленного напряжения высоковольтного источника.

Следует отметить, что такие выпрямительные секции выпускаются в БИЯФ в большом количестве как составная часть высоковольтных ускорителей серии ЭЛВ для технологических нужд. Рабочая частота выбрана относительно низкой – 500 Гц, значит, частота пульсации выпрямленного напряжения равна 1 кГц.

### 3. Генератор переменного напряжения частотой 500 Гц

Генератор переменного напряжения служит для формирования переменного синусоидального напряжения заданной амплитуды и построен на основе SWITCH-MODE технологии.

Силовым элементом является IGBT-инвертор мостового типа с широтно-импульсным (PWM) управлением. Питание инвертора осуществляется от трехфазного диодного выпрямителя с LC-фильтром. Инвертор подключен к нагрузке через LC-фильтр, настроенный на частоту 500 Гц. Таким

На рис. 4 показана функциональная схема последовательного стабилизатора напряжения.

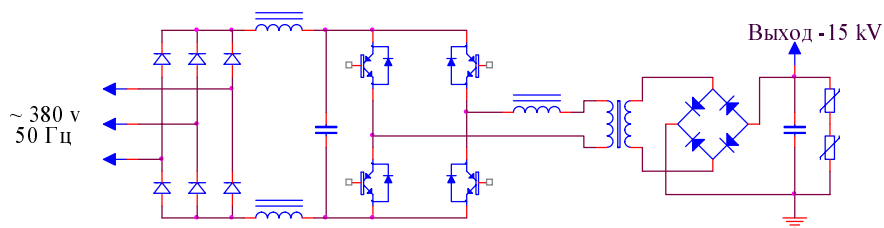


Рис. 4. Функциональная схема последовательного стабилизатора.

Последовательный стабилизатор напряжения является независимым устройством и присоединяется к высоковольтному источнику питания посредством коаксиального кабеля.

### 5. Система управления и стабилизации высоковольтного источника

На рис. 5 показан принцип совместной работы высоковольтного выпрямителя и последовательного стабилизатора. Стабилизация постоянной составляющей выходного напряжения осуществляется при помощи изменения скважности инвертора, питающего высоковольтный выпрямитель. Скважность определяется выходным напряжением усилителя сигнала ошибки 9, на неинвертирующий вход которого подаётся сигнал от управляющего ЦАП, а на инвертирующий – сигнал обратной связи.

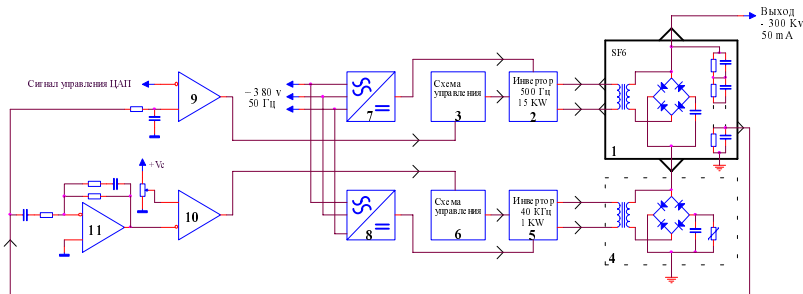


Рис. 5. Схема управления и стабилизации высоковольтного источника питания электронных трубок.

Снижение амплитуды пульсаций выходного напряжения достигается при помощи последовательного стабилизатора, напряжение которого зависит от выходного напряжения усилителя сигнала ошибки 10, на вход которого через усилитель 9 подаётся сигнал обратной связи. Усилитель 11 служит для усиления переменной составляющей сигнала обратной связи и коррекции АЧХ.

На рис. 6 показана осциллограмма переменной составляющей выходного напряжения, при постоянной составляющей напряжения, равной -300 КВ, 1 – без использования дополнительного стабилизатора, и 2 – с использованием последовательного стабилизатора.

Как видно из приведённой осциллограммы, использование последовательного стабилизатора позволяет уменьшить амплитуду пульсаций выходного напряжения более чем в 10 раз.

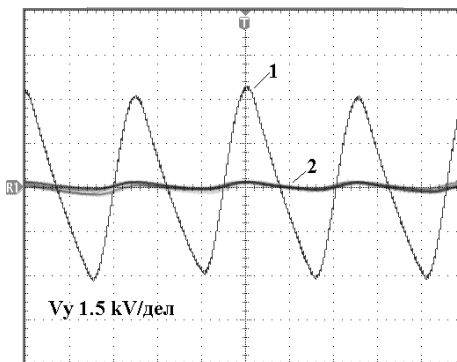


Рис. 6. Осциллограмма переменной составляющей напряжения.

### Литература

[1] V. Kolmogorov, A. Bulatov, Yu. Evtushenko, A. Medvedko. "High-voltage modulator with small energy accumulation". - EPAC 2000, p. 2208.  
 [2] D. Poole, L. Ford, Griffiths, M. Heron, C. Horrabin. - "A Crowbarless High Voltage Power Converter For RF Klystrons". EPAC 1997, p. 2326.