

# ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

## HIGH-VOLTAGE POWER SUPPLIES FOR ELECTRON-BEAM TECHNOLOGICAL INSTALLATIONS

**Г.М. МУСТАФА** (G.M. Mustafa), ООО «НПП ЛМ Инвертор», e-mail: gmm-mail@yandex.ru

**С.В. ЧИСТИЛИН** (S.V. Chistilin), ООО «НПП ЛМ Инвертор», e-mail: svchistilin@lm-inverter.ru

**А.Б. ЕРМАКОВ** (A.B. Ermakov), ООО «НПП ЛМ Инвертор», e-mail: alboer@yandex.ru

**С.И. ГУСЕВ** (S.I. Gusev), ООО «НПП ЛМ Инвертор», e-mail: gusev-si@lm-inverter.ru

*Обсуждаются вопросы использования мощных высоковольтных источников питания (ВИП) для технологических установок электронно-лучевой плавки металлов. Использование промежуточной частоты преобразования энергии позволило минимизировать массу и габаритные размеры ВИП и существенно улучшить их эксплуатационные характеристики. В качестве элементной базы преобразователей частоты использованы транзисторы с изолированным затвором (IGBT). Трансформаторы-выпрямители выполнены на основе ферритовых магнитопроводов с сухой воздушно-барьерной изоляцией. Описаны конструкции и характеристики ВИП на напряжение 30–40 кВ мощностью 150–450 кВт, созданные в Научно-производственном предприятии ООО «НПП ЛМ Инвертор».*

**Ключевые слова:** промежуточная частота, технологическое короткое замыкание, автоматическое повторное включение.

*The issues of using high-power high-voltage power sources (HVPS) for technological installations of electron-beam melting of metals are discussed. The use of an intermediate frequency of energy conversion made it possible to minimize the weight and overall dimensions of the VIP and significantly improve their operational characteristics. Isolated Gate Bipolar Transistors (IGBTs) are used as the element base of the frequency converters. Transformers-rectifiers are made on the basis of ferrite magnetic cores with dry air-barrier insulation. The article describes the designs and characteristics of the HVPS for a voltage of 30–40 kV with a power of 150–450 kW, created in the Scientific and Production Enterprise “NPP LM Inverter” LLC.*

**Keywords:** intermediate frequency, technological short circuit, automatic re-activation.

Электронно-лучевые технологии в вакуумной металлургии получили свое развитие, начиная с 60-х годов прошлого века, и по праву завоевали своё место в промышленном производстве для плавки, сварки, напыления тугоплавких и цветных металлов (титан, молибден, цирконий, вольфрам, никель, медь) и кремния. В настоящее время наибольшее распространение получили два типа электронно-лучевых нагревателей для вакуумной плавки: электронно-лучевые пушки с «холодным» катодом на основе высоковольтного тлеющего разряда и термокатодные электронно-лучевые пушки. Первые разработки пушек с накаливаемыми

катодами были осуществлены в 60-х и 70-х годах XX века в ГДР, ФРГ и Советском Союзе [1, 2], газоразрядные пушки были разработаны в то же время в СССР [2] и в настоящее время являются наиболее распространенными в установках по переплаву тугоплавких металлов и, в первую очередь, титана. Существуют также и установки с электронно-лучевым нагревом для зонной плавки металлов.

Совершенствование электронно-лучевых технологий требует соответствующего развития всего комплекса технологического оборудования, в том числе высоковольтных систем питания (ВИП) электронно-лучевых пушек (ЭЛП). Основным

назначением ВИП является подведение электрической энергии, необходимой для осуществления технологического процесса, а также обеспечение стабилизации и непрерывности работы при нестабильных режимах плавки и технологических пробоях в ЭЛП [2]. Современные источники высоковольтного питания (ВИП) для различного типа ЭЛП должны обеспечивать возможность:

- плавной регулировки и стабилизации уровня высокого напряжения и мощности ЭЛП;
- реализации режима автоматического повторного включения (АПВ) при пробоях в ЭЛП с регулировкой временных уставок;
- гибкого выбора режима работы основного (высоковольтного) и вспомогательных (прямой накал, электронный накал и др.) каналов питания с целью оптимизации технологического процесса плавки.
- максимальной автоматизации режимов работы ВИП.

Появление мощных биполярных транзисторов с изолированным затвором (БТИЗ=IGBT) позволило создавать системы питания с промежуточным звеном повышенной частоты, за счет чего радикально уменьшается масса и габариты трансформаторно-выпрямительного блока и системы питания в целом, в том числе за счет исключения сглаживающих и токоограничивающих реакторов [3]. В результате устраняются недостатки традиционных ВИП, работающих на сетевой частоте, такие как:

- большая масса и габаритные размеры;
- загрузка питающей сети реактивной мощностью;
- необходимость ограничения токов короткого замыкания в сети при технологических пробоях в ЭЛП;
- большая энергия, выделяющаяся в ЭЛП при технологических пробоях;
- низкое быстродействие систем АПВ при технологических коротких замыканиях.

Наличие небольшого вакуумного промежутка между катодом и анодом ЭЛП, к которому приложено ускоряющее напряжение, в сочетании с непрерывным процессом газообразования при плавке с необходимостью приводит к периодическим пробоям этого промежутка [1, 2]. Частота технологических пробоев, приводящих к коротким замыканиям основного энергетического канала ВИП, достигает 5–10 в секунду.

В таком режиме ВИП должен обеспечить:

- непрерывность технологического процесса без сбоев и остановок;
- ограничение бросков тока в питающей сети.

Применение ВИП с высокочастотным преобразованием энергии позволяет эффективно решать эти вопросы. Наличие в высокочастотном преобразователе промежуточного звена постоянного напряжения позволяет разделить энергетические процессы в сети и в цепи нагрузки [3]. Ток нагрузки целиком определяется регулятором высокочастотного инвертора, а ток сети определяется активной мощностью, потребляемой нагрузкой, которая при коротком замыкании уменьшается до нуля. Соответственно и ток, потребляемый из сети при к.з., также уменьшается до нуля. Благодаря высокой частоте преобразования, восстановление рабочего режима после пробоя и АПВ осуществляется в течение нескольких десятков микросекунд, что позволяет реализовать режим АПВ с частотой до  $10\text{ с}^{-1}$ . При этом имеется возможность оптимизации технологических режимов за счет корректировки алгоритма АПВ при технологических пробоях в ЭЛП.

Возможность гибкой настройки реакции ВИП на пробой позволяет использовать один ВИП для питания двух и более электронно-лучевых пушек.

На рисунках 1–4 показаны осциллограммы токов и напряжений, иллюстрирующие совместную работу современного ВИП и газоразрядной ЭЛП. Осциллограммы сняты на промышленных установках КВ-1 и ЭЛО в ООО «Завод вакуумной металлургии» (ООО «ЗВМ», г. Кулебаки) при плавке и оплавлении титана.

На всех осциллограммах приведены модули токов и напряжений в ВИП-ЭЛП без учёта знака.

На рисунке 1 приведены осциллограммы токов и напряжений при технологическом пробое в пушке во время плавки титана при токе около 6,5 А (мощность плавки порядка 200 кВт). При электрическом пробое в ЭЛП и коротком замыкании ВИП на стороне нагрузки ВИП из режима стабилизатора напряжения переходит в режим ограничителя/стабилизатора тока на уровне порядка 15 А. Первый бросок тока, вызываемый разрядом емкости высоковольтного кабеля, ограничивается специальной пассивной токоограничивающей цепью на выходе выпрямителя. В течение времени выдержки, равной 4 мс (задается как техно-

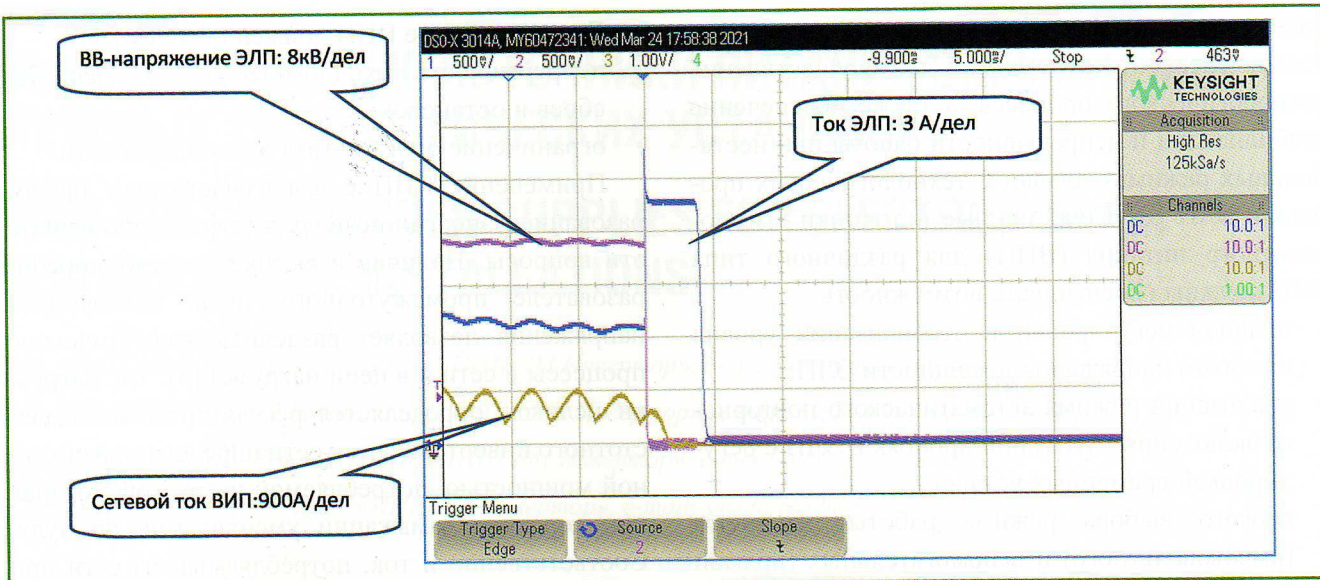


Рис. 1 Пробой в ЭЛП

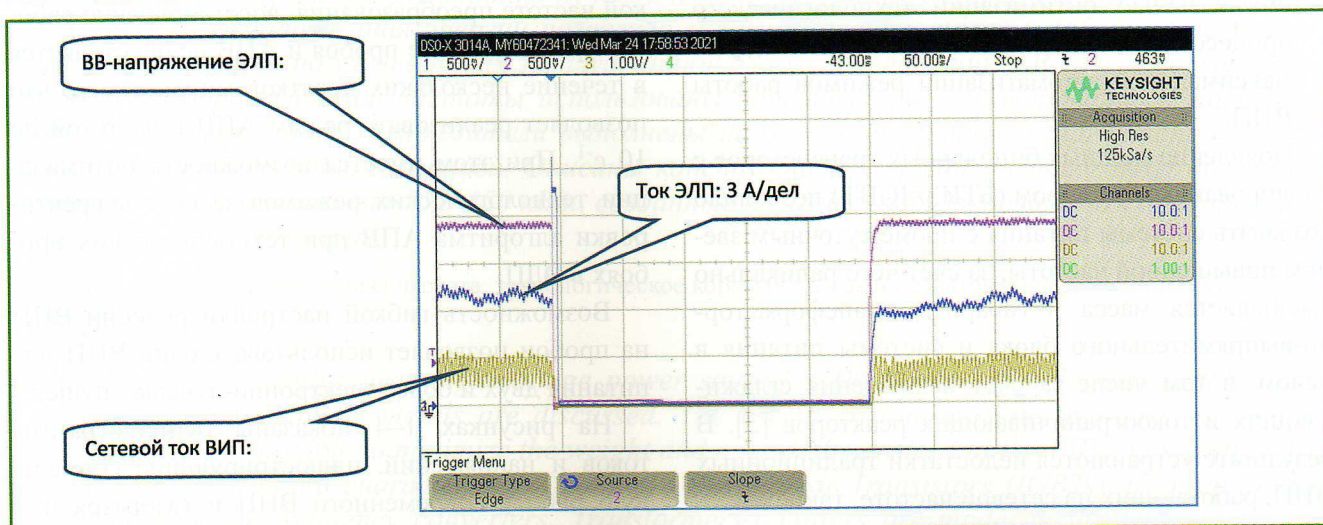


Рис. 2 Пробой в ЭЛП и автоматическое повторное включение

логический параметр), система управления ВИП ожидает восстановления электрической прочности промежутка «анод-катод» ЭЛП. В случае, если этого не происходит (см. рис. 1) ВИП снимает питание с ЭЛП и через заданный промежуток времени повторно подает высокое напряжение на ЭЛП. Время АПВ, так же как и время выдержки, задаётся с панели управления ВИП. На рисунке 2 показано автоматическое повторное включение – подача высокого напряжения на ЭЛП через время АПВ, равное 250 мс. Ток короткого замыкания в пушке не превосходит заданного уставкой, а потребление тока из промышленной сети 3×380 В снижается до нуля. Короткое замыкание на выходе ВИП не приводит к короткому замыканию в питающей сети.

Процесс возвращения энергоблока ВИП-ЭЛП к нормальному технологическому состоянию плавки происходит без бросков и ударов тока по сети и тяжёлых переходных процессов.

На рисунке 3 показан случай, когда после возникновения пробоя и перехода работы ВИП в режим ограничения тока, через 2 мс происходит самовосстановление электрической прочности катодно-анодного промежутка, пушка переходит в рабочее состояние, плавка продолжается.

На рисунке 4 показан «сдвоенный» пробой в ЭЛП. После первого АПВ произошёл повторный пуск ВИП и практически сразу – повторный пробой. После второго АПВ восстановился штатный режим плавки. В зависимости от технологии и вида переплавляемого металла/сплава частота тех-

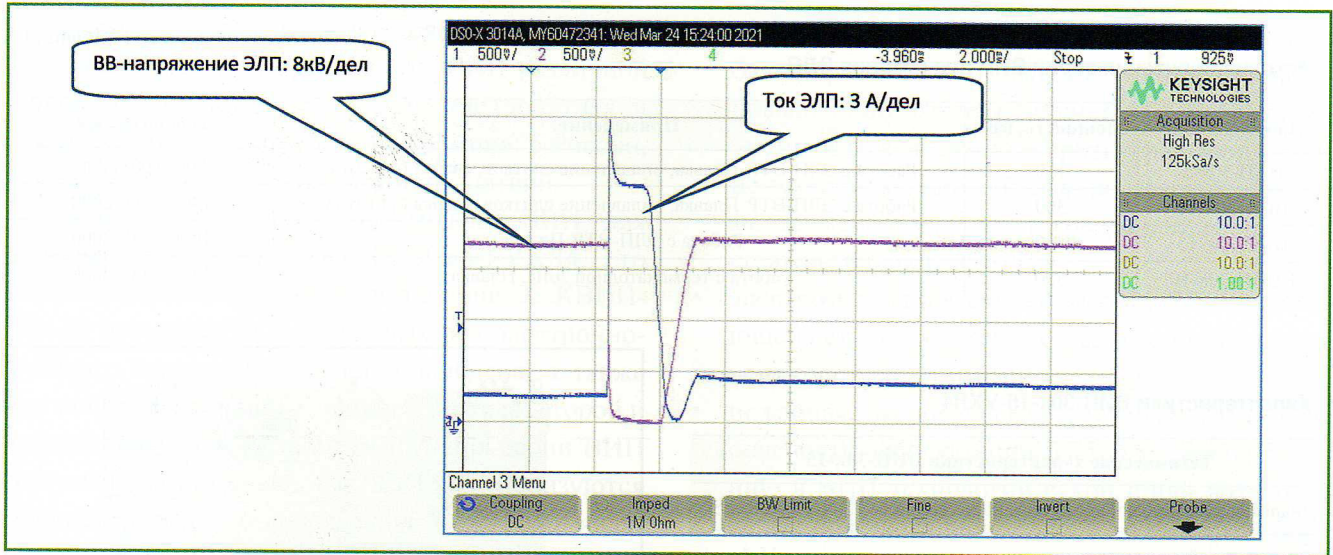


Рис. 3 Самовосстанавливающийся пробой в ЭЛП при питании от современного ВИП

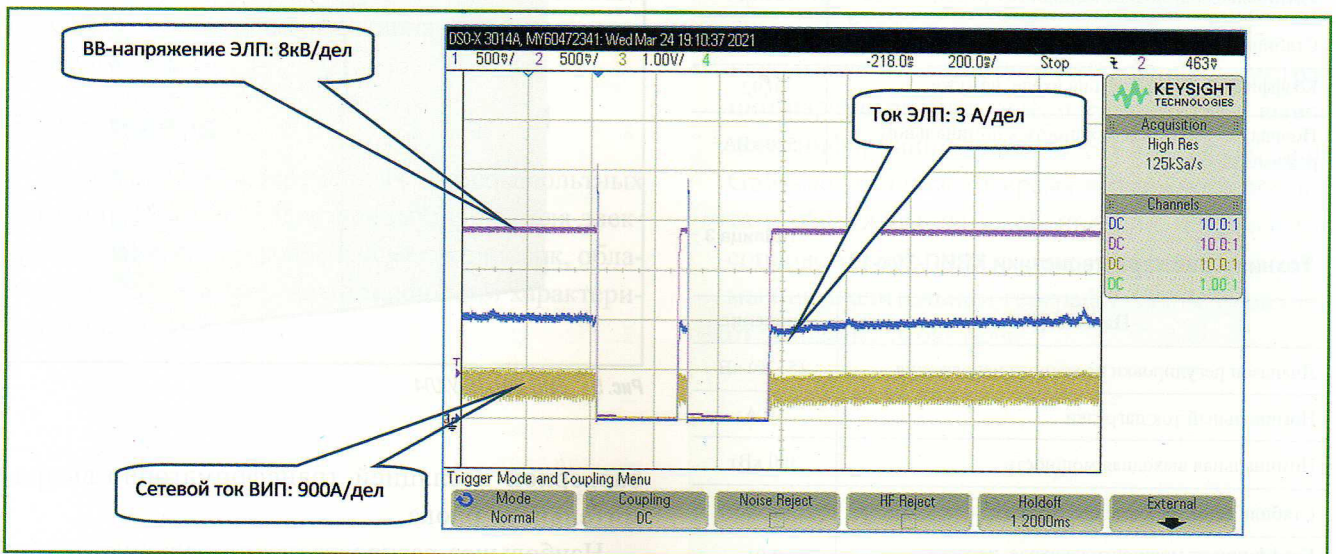


Рис. 4 Повторяющиеся пробои в ЭЛП

нологических пробоев в процессе плавки может достигать 10 Гц.

Современные ВИП позволяют оптимизировать процессы управления мощностью ЭЛП. Так, например, для бестигельной зонной плавки вольфрама (молибдена) вместо отдельного управления ускоряющим напряжением и током накала катода был успешно реализован режим их связанного регулирования, обеспечивший стабилизацию мощности плавки, что позволило получить лучшую геометрию и минимальную стрелу прогиба изделия на выходе. Аналогично был реализован режим стабилизации тока луча на установке ЭМО-250 с использованием термокатодной ЭЛП, позволивший добиться повышения качества плавки вольфрама.

Научно-производственное предприятие ООО «НПП ЛМ Инвертор» имеет более чем двадцатилетний опыт изготовления, поставки, ввода в эксплуатацию и технического сопровождения компактных высоковольтных источников питания для электронно-лучевых пушек различной конструкции и принципа действия:

- газоразрядных ЭЛП с холодным катодом мощностью от 30 до 450 кВт;
- термокатодных прямонакальных ЭЛП с кольцевым катодом для бестигельной зонной плавки мощностью до 75 кВт;
- термокатодных сварочных и плавильных ЭЛП с электронным накалом мощностью от 10 до 300 кВт.

Все высоковольтные источники питания

Таблица 1

Источники питания серии ВИП для питания ЭЛП

Наименование	Мощность, кВт	Применение	Габариты, мм
ВИП-30к-5	150	Работа с ЭЛП-ВТР. Плавка, оплавление слитков, сварка брикетов.	800×800×2000
ВИП-30к-10	300	Работа с ЭЛП-ВТР. Плавка, оплавление слитков, сварка брикетов.	1400×800×2000
ВИП-30к-15	450	Работа с ЭЛП-ВТР. Плавка.	1400×800×2000
КВИП-30к-10	300	Работа с термокатодной ЭЛП. Плавка.	1400×800×2000

Таблица 2

Характеристики ВИП-30к-15-УХЛ4

Технические характеристики ВИП-30к-15	
Диапазон регулировки выходного напряжения	-(5–30) кВ
Номинальный ток нагрузки	15 А
Номинальная выходная мощность	450 кВт
Стабилизация напряжения – не хуже	1 %
Коэффициент мощности на входе, не хуже	0,92
Полная потребляемая мощность в номинальном режиме, не более	520 кВА

Таблица 3

Технические характеристики КВИП-30к-10

Параметр	Значение
Диапазон регулировки выходного напряжения	-(5–30) кВ
Номинальный ток нагрузки	10 А
Номинальная выходная мощность	300 кВт
Стабилизация напряжения, не хуже	1 %
Коэффициент мощности на входе, не хуже	0,91
Полная потребляемая мощность в номинальном режиме, не более	350 кВА
Источник питания прямого накала	
Диапазон регулировки выходного тока	10–100 А
Номинальная выходная мощность	2000 Вт
Стабилизация тока накала, не хуже	± 1 %
Источник питания электронного накала	
Диапазон регулировки выходного напряжения	100–2000 В
Максимальное значение выходного тока	1,5 А
Стабилизация напряжения, не хуже	± 1 %

выполнены по схеме статических преобразователей электрической энергии с промежуточным звеном постоянного тока и трансформацией электрической энергии на высокой частоте по модульной топологии, с сухой воздушно-



Рис. 5 ВИП-30к-15-УХЛ4

барьерной изоляцией трансформаторно-выпрямительного блока.

Наибольшее распространение получили источники питания ЭЛП высоковольтного тлеющего разряда (ЭЛП-ВТР), применяемые для переплава титана, ниобия, гафния и тантала (так называемого первого переплава). Источники питания ЭЛП-ВТР серии ВИП (табл. 1) имеют выходное напряжение 30 кВ, достаточно высокий уровень мощности 300–450 кВт и обеспечивают эксплуатацию технологических установок при технологических электрических пробоях в ЭЛП (до 10 Гц), которые отрабатываются источником в автоматическом режиме. По заказу возможен выпуск ВИП на напряжение от 25 до 40 кВ.

Наиболее востребованная модель ВИП для ЭЛП-ВТР – ВИП-30к-15-УХЛ4, характеристики которого приведены в таблице 2.

ВИП-30к-15-УХЛ4 размещается в шкафу с габаритными размерами (Ш × Г × В) 1400 × 800 × 2000. Масса ВИП 750 кг.

На сегодняшний день изготовлены и находятся в эксплуатации более 100 шт. ВИП различной мощности на металлургических предприятиях и предприятиях по производству кремния: в России, Казахстане, КНР, Японии, Эстонии, Латвии.

Наиболее востребованная модель ВИП для термокатодных ЭЛП – КВИП-30к-10-УХЛ4. Его характеристики приведены в таблице 3. КВИП-30к-10 применяется в установках для электронно-лучевого переплава ванадия, молибдена, а также для «чистого» переплава ниобия, тантала (второй и третий переплав). Источники питания серии ВИП для питания термокатодных ЭЛП характеризуются уровнем выходного напряжения 30–40 кВ и являются комплектными высоковольтными источниками питания (КВИП) с установленными на высоком потенциале источниками питания прямого и электронного накала.

## **Заключение**

Освоен ряд современных высоковольтных источников питания электронных пушек для электронно-лучевых технологических установок, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками, такими как:

- минимальные массо-габаритные параметры благодаря использованию промежуточной повышенной частоты, за счет чего радикально уменьшается масса и габариты трансформаторно-выпрямительного блока, исчезает необходимость использования токоограничивающих и сглаживающих реакторов;
- электромагнитная совместимость ВИП с питающей сетью за счет естественного ограничения тока короткого замыкания;
- пожарная, экологическая и электрическая безопасность эксплуатации благодаря использованию в ВИП технологий сухой и/или воздушно-барьерной изоляции без применения трансформаторного масла;
- простота обслуживания, обеспечиваемая модульной топологией конструктивного исполнения ВИП;
- использование в составе ВИП блока регистрации параметров (т.н. «чёрного ящика») с выводом информации через USB-интерфейс или GSM-модем снижает время возможного ремонта и обслуживания, особенно при техническом сопровождении систем питания, эксплуатируемых на значительном географическом удалении от завода-изготовителя.

## **Литература**

1. З. Шиллер, У. Гайзиг, З. Панцер. Электронно-лучевая технология. – М.: «Энергия», 1980. – 528 с.
2. Мощные электронные пушки для электронно-лучевой технологии и системы питания к ним. Сборник статей под ред. В.И. Переводчикова. Выпуск 80. – М. «Энергия», 1970. – 271 с.
3. С.И. Гусев, Г.М. Мустафа, В.И. Переводчиков, Н.В. Матвеев, П.Ю. Крашенинин. Перспективные высоковольтные источники питания большой мощности на основе высокочастотных трансформаторов с твердой изоляцией и электронных коммутаторов. – Высоковольтная и преобразовательная техника. Сб. научных трудов ГУП ВЭИ им. В.И. Ленина, Москва, 2001, стр. 82-92.