



УДК 621.314

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО НАГРЕВА

**В. В. Мартынов, Ю. П. Монжеран, А. Г. Можаровский,
Б. Б. Лебедев, Г. Е. Смитюх,
Н. В. Чайка, А. М. Иванов**

Приведены основные результаты разработки и испытаний высоковольтного источника электропитания для электронно-лучевых пушек технологических установок.

The basic results of development and tests of a high-voltage source of the power supplies for electron beam guns of technological installations are given

Ключевые слова: высокочастотный преобразователь; высоковольтный источник питания; многофазный инвертор; трансформаторно-выпрямительный модуль; электронно-лучевая пушка; высоковольтные пробои; накопленная энергия

При использовании в промышленности современных электротехнологий, в которых применяют электронно-лучевые, плазменные, дуговые, лазерные и другие способы обработки материалов, возникает потребность в создании специализированных источников электропитания. Кроме обычных требований по регулированию и стабилизации выходного напряжения или тока, к ним предъявляются специфические, отражающие свойства электротехнологических установок (обеспечение непрерывности технологического процесса при возникновении пробоев в вакуумной камере или в электронной пушке, приводящих к короткому замыканию выхода высоковольтного источника; поддержание режима тлеющего разряда без перехода его в дуговой разряд; ограничение уровня выходного тока при динамических возмущениях в нагрузке и т. п.). Источник электропитания должен обеспечивать эффективную работу установки в режимах от холостого хода до короткого замыкания и при этом отличаться хорошими динамическими характеристиками.

Применение устройств силовой электроники, работающих на частоте промышленной сети, для целей электротехнологии зачастую не позволяет реализовать все преимущества новых технологических процессов и ограничивает их производительность.

Мощность современных электронно-лучевых пушек превышает сотни киловатт при напряжении на нагрузке в несколько десятков киловольт. Особенностью работы электронно-лучевых пушек является наличие периодических пробоев, поэтому при больших мощностях требуются минимизация запаса энергии в системе электропитания и быстродействующее ограничение уровня выходного тока высокого напряжения.

Эти требования вступают в противоречие с показателями качества электроэнергии, в частности по уровню пульсаций выходного напряжения, который традиционно обеспечивается применением энергоемких электрических фильтров.

В таких устройствах пробой в цепях пушки приводят к мгновенному разряду емкости фильтра, что является одной из причин возникновения сверхтоков разряда, многократно превышающих рабочий ток и приводящих к возникновению дефектов в изделии и на поверхности катода. Наличие большой индуктивности в выходной цепи источника способствует улучшению условий перехода кратковременных импульсных пробоев в длительные дуговые, что приводит к повышению частоты дуговых разрядов. Кроме того, при пробое напряжение может меняться со значительной скоростью, что вызывает появление импульсных токов смещения, способствующих сбою и даже выходу из строя электронных узлов.

Указанным требованиям к качеству электроэнергии при наличии нестационарных пробоев меж-



ду электродами пушки удовлетворяет специализированный высоковольтный источник питания «ДЖЕН 30-15», предназначенный для питания электронно-лучевых пушек с «холодным катодом» [1]. Он разработан в Институте электродинамики Национальной Академии наук Украины по техническому заданию специалистов международной компании «Антарес».

В высоковольтных источниках питания этого типа преобразование электроэнергии происходит на частоте 20 кГц. В качестве переключающих элементов использованы транзисторы IGBT [2]. Применение модульного принципа позволило равномерно распределять электрические и тепловые нагрузки между узлами конструкции и тем самым снижать плотность энергии тепловыделения, упростить конструкцию преобразователя. Благодаря синхронному несинфазному управлению токи отдельных модулей смещены во времени, что обеспечивает улучшение параметров электроэнергии как на входе, так и на выходе источника питания.

Одновременное использование синхронного несинфазного управления и высокочастотного преобразования энергии дало возможность, с одной стороны, существенно уменьшить выходную емкость источников питания, а в некоторых случаях, и отказаться от использования конденсаторов фильтра на стороне высокого напряжения, с другой, — реализовать быстроедействие отработки сигналов управления источником питания, добиться оптимальных переходных процессов при возмущениях в нагрузке.

Основными узлами высоковольтного источника питания являются модульный инвертор и трансформаторно-выпрямительный модуль (ТВМ). Структурная схема высоковольтного источника питания представляет собой последовательное соединение силового выпрямителя с емкостным фильтром, модульного инвертора и ТВМ.

Модульный инвертор — это многофазный регулируемый высокочастотный инвертор с импульсной модуляцией, формирующий на выходе двухполярные импульсы напряжения прямоугольной формы, которые в ТВМ трансформируются до необходимого уровня высокопотенциальными обмотками высокочастотного трансформатора и выпрямляются многокаскадным выпрямителем. Для снижения скачков потребляемого тока при подключении устройства к питающей сети в силовом выпрямителе реализована функция плавного заряда входного емкостного фильтра.

Регулирование и стабилизация высокого напряжения источника при колебаниях тока нагрузки и напряжения питающей сети осуществляются путем соответствующего изменения относительной длительности импульсов управления транзисторами инвертора.

В источнике устранено техническое противоречие между требованием высокого качества выходной электроэнергии и количеством запасаемой энергии, накапливаемой в выходных цепях, за счет

выполнения высокочастотной преобразовательной части устройства в виде многофазной схемы, в которой инверторная часть представляет собой группу полумостовых инверторов с токоограничивающими дросселями на выходе.

При выключении инвертора энергия, запасенная в дросселях, возвращается в конденсаторы фильтра силового выпрямителя, минуя первичную цепь ТВМ, что позволяет осуществлять быстрое отключение высокого напряжения от нагрузки и мгновенное ограничение тока при любых перегрузках.

Высоковольтный источник питания может работать в одном из двух режимов стабилизации: выходного напряжения или выходного тока. Стабилизация выходного напряжения — это основной режим работы системы управления, когда выходной ток изменяется в диапазоне от 0 до 15 А.

При обнаружении дугового разряда или возникновении условий, которые можно трактовать как начало дугового разряда, система управления переходит в режим ограничения тока. Это позволяет в случае пробоя в электронно-лучевой пушке предотвращать развитие дугового разряда.

Если ток нагрузки не уменьшается в течение некоторого времени, система управления отключает источник питания на время от 0,2 до 100 мс и затем вновь возвращает его в основной режим работы.

Прекращение разряда приводит к уменьшению тока нагрузки, и система управления вновь возвращает источник питания в основной режим работы — стабилизацию выходного напряжения. Такой алгоритм обеспечивает стабильную работу высоковольтного источника питания при пробоях в электронной пушке.

ТВМ обеспечивает эффективную передачу энергии в выходную цепь источника питания и гальваническую развязку на уровне 50 кВ высоковольтных и низковольтных цепей. Малые габариты трансформаторно-выпрямительного модуля, высокая электрическая прочность его высоковольтной изоляции и эффективный отвод тепла от тепловыделяющих элементов обеспечены за счет применения специальной конструкции ТВМ и жидкого синтетического диэлектрика.

Разработанный ТВМ характеризуется высокой эффективностью, удовлетворяет требованиям к качеству выходной энергии при «сбросах-набросах» нагрузки, отличается стойкостью к коммутационным перенапряжениям и пробоям.

В источнике питания для электронно-лучевого нагрева «ДЖЕН 30-15» реализованы следующие функции:

стабилизация высокого напряжения (осуществляется по многоконтурной схеме с обратными связями по току модулей инвертора, току нагрузки, выходному напряжению и др.);

максимальная токовая защита (ограничение токов через переключающие элементы инвертора на допустимом уровне);

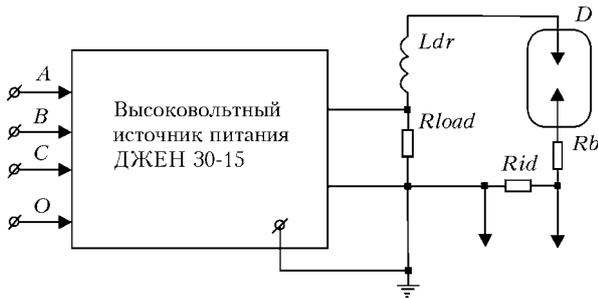


Рис. 1. Схема исследования влияния высоковольтных пробоев на динамические характеристики источника электропитания от трехфазной сети переменного тока

автоматический повторный пуск — прерывание выходного тока инвертора на определенное время, достаточное для разрушения дугового разряда в случаях, когда возникают пробои или короткое замыкание, длительность которых превышает заданное значение.

В высоковольтном источнике питания использовано микропроцессорное управление с применением современных цифровых сигнальных процессоров, реализующее гибкий алгоритм управления источником в различных режимах работы, что позволяет согласовывать работу системы электропитания с центральным компьютерным управлением и обеспечивает непрерывность технологического процесса.

Высоковольтные источники питания «ДЖЕН 30-15» компактны, конструктивно просты и могут быть установлены рядом с электронно-лучевой установкой, что положительно отражается на качестве переходных процессов при пробое в пушке и позволяет сократить расходы при строительстве электронно-лучевой установки.

Основные технические параметры источника питания «ДЖЕН 30-15»

Выходное напряжение, кВ	0... 30
Максимальный выходной ток, А.....	15
Уровень ограничения выходного тока.....	130 %
	максимального значения.

На этапе испытаний изучали динамические характеристики высоковольтного источника питания «ДЖЕН 30-15» в режимах высоковольтных пробоев

ев [3] по схеме, приведенной на рис. 1, при помощи вспомогательного устройства — эквивалента разрядной нагрузки, позволяющего имитировать высоковольтные пробои. В нем последовательно соединены воздушный разрядник D с балластным резистором Rb . Разрядник имеет конфигурацию электродов типа игла–плоскость и регулируемое расстояние между ними в пределах 5... 35 мм. Балластное сопротивление Rb представляет собой набор резисторов. Для измерения тока пробоя I_d последовательно с эквивалентом разрядной нагрузки включен резистор $Rid = 0,1$ Ом. Выход источника соединен с высокопотенциальным электродом разрядника через высоковольтный кабель типа КВЭЛ-60 и высоковольтный дроссель индуктивностью Ldr . Часть испытаний проводили при сопротивлении нагрузки $Rload$, подключенным непосредственно к выходу высоковольтного источника.

При имитации пробоев в нагрузке высоковольтного источника расстояние между электродами разрядника D устанавливали так, чтобы пробой произошел при заданном выходном напряжении «ДЖЕН 30-15». Измеряемые токи и напряжения регистрировали цифровым запоминающим осциллографом типа GDS-806S. Характер динамических процессов на выходе высоковольтного источника питания в двух реализациях высоковольтного пробоя по схеме рис. 1 представлен на рис. 2.

На рис. 2, *a* показаны переходные процессы на выходе источника U_n (верхняя кривая) и тока I_n через разрядник D в режиме холостого хода источника ($Rload = \infty$). В начальный момент времени $t = 0$ выходное напряжение U_n плавно нарастает до установленного значения, затем начинается коронный разряд (появляются характерные всплески на вершине кривой U_n), который в момент времени $t = 220$ мкс переходит в дуговой разряд, и в разряднике D наступает пробой.

Выходное напряжение падает до нуля. Короткий импульс тока разряда I_n на этой начальной стадии пробоя (рис. 2, *a*) обусловлен разрядом паразитных емкостей высоковольтных цепей источника, высоковольтного дросселя Ldr и схемы испытаний.

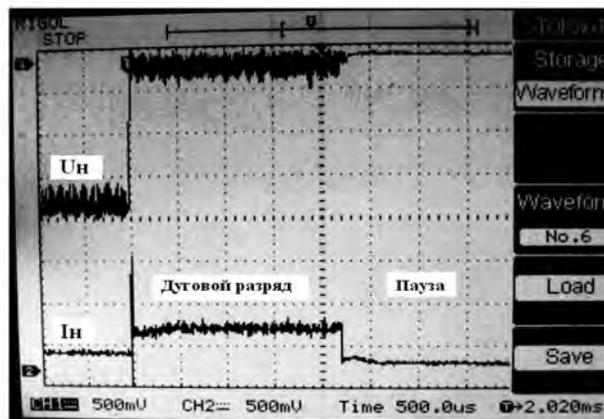
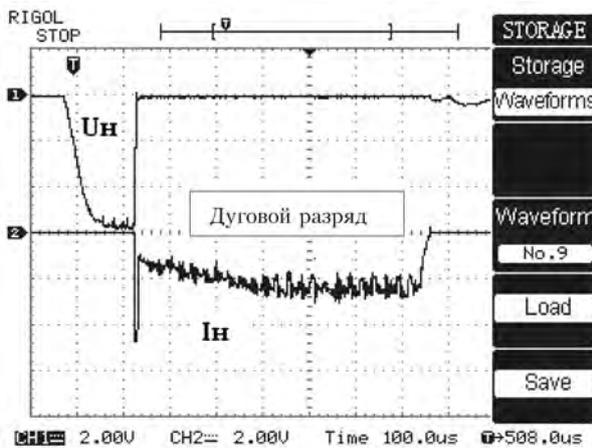


Рис. 2. Пробои в схеме рис. 1 при работе источника в режиме холостого хода (*a*) и в режиме рабочих токов нагрузки (*b*)



Напряжение на выходе остается равным нулю, а ток разряда I_n плавно нарастает до заранее выбранного тока ограничения, а затем быстро падает при включении паузы. Всплески амплитуды тока разряда на этом интервале связаны с частотой коммутации транзисторов инверторов. Процесс пробоя заканчивается, ток разряда I_n падает до нуля, выходное напряжение увеличивается, источник продолжает работу.

На рис. 2, б представлены переходные процессы при работе источника в режиме рабочих токов. В исходном состоянии, на интервале времени от нуля до 1 мс, источник работает в режиме стабилизации выходного напряжения U_n (верхняя кривая), а выходной ток I_n (нижняя кривая в инверсной полярности) равен току через резистор R_{load} . В момент времени $t = 1$ мс начинается пробой, сопротивление нагрузки R_{load} шунтируется цепью короткозамкнутого разрядника D и соединенного с ним балластного резистора R_b . При этом ток I_n равен сумме токов через резисторы R_{load} и R_b . Напряжение U_n падает, а в выходном токе появляется короткий импульс тока разряда паразитных емкостей, по окончании которого в источнике начинается этап стабилизации тока в дуговом промежутке разрядника и последующий выход на бестоковую паузу.

Таким образом, при пробоях в нагрузке система управления источника «ДЖЕН 30-15» переходит в режим автоматического повторного включения, при котором принудительно ограничивается выходной ток, исключая тем самым условия для перехода искрового разряда в дуговой. По истечении определенного времени система управления выключает источ-

ник питания, удерживает заданную временную паузу для полного прекращения дугового разряда, после чего выполняется автоматическое повторное включение источника питания. Такой режим повторяется циклически.

Проведенные испытания показали, что система управления вместе с модульным инвертором обеспечивает регулирование и стабилизацию выходного напряжения с плавным выходом на установившиеся значения. Экспериментально подтверждено, что реализованные в источнике питания «ДЖЕН 30-15» способы высокочастотного преобразования электроэнергии и активного ограничения токов нагрузки во время пробоев обеспечивают эффективное прекращение дуговых разрядов, способствуют повышению производительности и качества технологического процесса.

1. Пат. 29547 Украина, МПК В 23 К 15/00, Н02М 7/515. Устройство электропитания электронно-лучевой установки / В. В. Мартынов, Н. С. Комаров. — Опубл. 15.11.2000; Бюл. № 6.
2. Дослідження та розробка напівпровідниково-трансформаторних перетворювачів для живлення електротехнологічного обладнання / К. О. Липківський, В. В. Мартинов, Ю. В. Руденко та ін. // Інститут електродинаміки НАН України: Зб. наук. праць. — Київ: ІЕД НАНУ. — 2009. — Вип. 23. — С. 72–82.
3. Шидловская Н. А., Мартынов В. В. Согласование высоковольтного источника питания с электронно-лучевой установкой // Технічна електродинаміка. — 2010. — №1. — С. 73–79.

Інститут електродинаміки НАН України, Київ
МК «Антарес», Київ
Поступила 13.05.2010

Международная конференция «Ti-2010 В СНГ»

16–19 мая 2010 г. в г. Екатеринбурге (Россия) состоялась организованная межгосударственной ассоциацией «Титан» традиционная ежегодная международная конференция «Титан в СНГ». В конференции приняли участие более 230 участников из России, Украины, Казахстана, Таджикистана, Китая, Германии, Франции, Италии, Японии, Люксембурга, Польши и других промышленно развитых стран. На конференции выступили с докладами ученые и специалисты в области титана из ведущих научно-исследовательских организаций и промышленных предприятий России и Украины (ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», ФГУП «Всероссийский институт авиационных материалов», ОАО «Всероссийский институт легких сплавов», ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет — УПИ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», «МАТИ» — Российского государственного технологического университета им. К. Э. Циолковского, Института проблем сверхпластичности метал-

лов РАН, Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН, ОАО «Корпорация «ВСМПО-АВИСМА», ФГУП «Гиредмет», ОАО «Уралредмет», ООО «ОКБ Сухого», ОАО «Электромеханика», ОАО «Калужский турбинный завод», Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Института металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, Института проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, Донецкого физико-технического института им. О. А. Галкина НАН Украины, Государственного научно-исследовательского и проектного Института титана, ГП «Антонов» и др.). Всего представлено более 90 докладов на секциях «Сырье. Металлургия» и «Металловедение и технологии титановых сплавов». Кроме того, проведены заседания дискуссионного клуба «Современные особенности мирового рынка титана» и тематического семинара «Плавка титана».