

УДК 533.95

Ю.А. СЫСОЕВ, С.И. ПЛАНКОВСКИЙ, А.В. ЛОЯН, Н.Н. КОШЕЛЕВ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## ВОЗБУЖДЕНИЕ ДУГОВОГО РАЗРЯДА В СИЛЬНОТОЧНОМ ГЕНЕРАТОРЕ ПЛАЗМЫ

В работе исследуется вопрос запуска сильноточного генератора плазмы, работающего при атмосферном давлении. На основе проведенного анализа обосновывается выбор метода инициирования дуги высокочастотным напряжением. Предложен способ повышения надежности запуска плазменных устройств при использовании в цепях запуска импульсных повышающих трансформаторов. Приведены осциллограммы работы разработанного осциллятора, обеспечивающего надежное возбуждение дугового разряда в сильноточном генераторе плазмы.

**зажигание разряда, дуговой разряд, сильноточный генератор плазмы, высокочастотное напряжение**

### Введение

К настоящему времени имеется достаточно большое количество публикаций, посвященных физике и технике работы плазмотронов самого различного назначения [1 – 3]. Однако физике запуска плазмогенерирующих устройств, а в особенности техническим реализациям систем инициирования разряда в отмеченных работах практически не уделяется внимания. Такое же, недостаточно должное внимание к системам инициирования, имеется в подавляющем большинстве работ по другим плазменным устройствам. Между тем система запуска любого плазменного устройства, в том числе и плазмотрона, являясь вспомогательной, но нетемлемой его частью, во многом определяет надежность работы всего устройства в целом.

### 1. Краткий анализ предшествующих технических решений

Запуск сильноточных плазменных устройств различного назначения производится, как правило, в несколько этапов [4 – 6]. В случае запуска вакуумно-дуговых источников плазмы широкое распространение получили способы, в которых начальный форсгусток плазмы создается специальными пуско-

выми инжекторами [7]. Перспективным здесь является также использование перехода тлеющего разряда в дуговой системе электродов со скрещенными  $E \times H$  полями. [8]. Однако трудности, обусловленные тем, что возбуждение тлеющего разряда происходит в левой части кривой Пашена, препятствуют использованию этого метода при давлениях ниже  $10^{-4}$  мм рт. ст. из-за необходимости существенного повышения напряжения пускового импульса до значений в несколько десятков киловольт.

При запуске плазменных устройств, работающих при атмосферном или близких к нему значениях давлений газов, в отличие от вакуумно-дуговых устройств, наоборот, большее распространение получили способы возбуждения основного дугового разряда с помощью тлеющего. Причинами этого являются следующее. Во-первых, возбуждение тлеющего разряда при указанных давлениях и характерных расстояниях межэлектродного промежутка происходит в правой части кривой Пашена, где напряжение зажигания тлеющего разряда не превышает нескольких киловольт. Так, напряжения зажигания тлеющего разряда при атмосферном давлении при используемых в плазменных устройствах характерных расстояниях между электродами системы поджига порядка 2 мм имеет величину 8 кВ для возду-

ха и порядка 2,2 кВ для аргона. Во-вторых, формирование пускового тлеющего разряда возможно осуществить в системе достаточно массивных и водоохлаждаемых электродов, что позволяет обеспечить высокий ресурс системы поджига плазменного устройства в целом.

В общем случае при наличии газа в разрядном промежутке и подаче на него высокочастотного напряжения, функция  $U_{np} = f(\omega)$  имеет минимум. Так, в [9] отмечается, что в диапазоне частот 1 – 100 МГц напряжение зажигания, а также и напряжение потушения имеют минимум, а затем вновь повышаются в области еще больших частот.

Таким образом, применение для запуска плазменного устройства высокочастотных колебаний должно обеспечить снижение напряжения, подаваемого на поджигающий электрод устройства. С другой стороны, ток высокой частоты и высокого напряжения более безопасен для человека [10]. Отмеченные преимущества использования высокочастотного разряда для запуска рассматриваемого плазменного устройства послужили обоснованием нижеприведенных исследований.

## 2. Повышение эффективности работы схем запуска

В подавляющем большинстве случаев для формирования высоковольтного пускового импульса, в том числе и высокочастотного, используют импульсные повышающие трансформаторы. Примером такого устройства для возбуждения дуги в плазменном генераторе является устройство по патенту США [11]. Применение намоточных элементов, обладающих довольно значительной индуктивностью, приводит к ухудшению условий возникновения пускового разряда из-за противодействия э.д.с. самоиндукции быстрому росту тока в начальной стадии развития разряда.

Устранение этого недостатка возможно с помощью устройства, приведенного на рис. 1.

Введение в это устройство возбуждения дуги коммутирующего элемента 17 обеспечивает при его открытии в начальный момент пробоя (при срабатывании датчика тока) практически мгновенный рост тока в разрядном промежутке до максимальных значений за счет шунтирования индуктивности вторичной обмотки импульсного повышающего трансформатора.

Использование в устройстве диода 11 создает колебательный процесс.

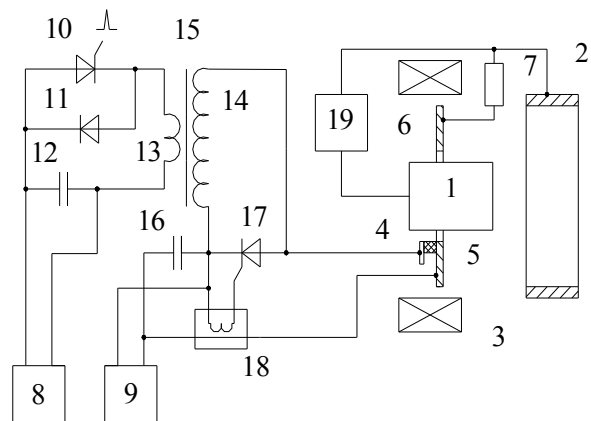


Рис. 1. Поджигающее устройство с разделенными обмотками импульсного трансформатора: 1 – катод; 2 – анод; 3 – соленоид; 4 – поджигающий электрод; 5 – диэлектрическая вставка (может отсутствовать); 6 – вспомогательный электрод; 7 – сопротивление; 8 – источник питания пусковых импульсов; 9 – источник питания основного пускового разряда; 10 – коммутирующий элемент цепи запуска; 11 – релаксационный диод; 12 – дополнительная емкость; 13 – пусковая (первичная) обмотка; 14 – повышающая обмотка импульсного трансформатора; 15 – импульсный трансформатор; 16 – основная пусковая емкость; 17 – коммутирующий элемент; 18 – датчик тока; 19 – источник питания дуги

Таким образом, разработанное устройство позволяет повысить надежность возбуждения дуги в плазмотроне до максимальных значений за счет резкого увеличения тока в разрядном промежутке в начальный момент времени существования пускового разряда и улучшить условия возникновения пробоя путем создания высокочастотного импульса.

### 3. Описание методики эксперимента

Экспериментальное исследование условий возникновения пробоя разрядного промежутка проводилось в устройстве, изображенном на рис. 2. Электроды были выполнены из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Диаметр поджигающего электрода 2 равнялся 68 мм и не менялся в ходе экспериментов. С целью изменения величины разрядного промежутка между катодом и поджигающим электродом, катод имел возможность перемещения вдоль оси устройства. В ходе проводимых экспериментов использовался воздух и аргон при атмосферном давлении.

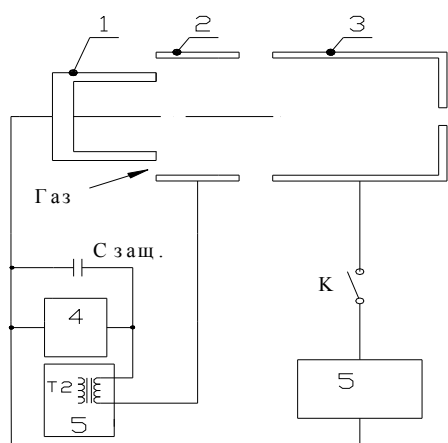


Рис. 2. Схема подключения плазменного устройства к источникам питания:

- 1 – катод; 2 – поджигающий электрод; 3 – анод;
- 4 – источник питания поджигающего разряда;
- 5 – осциллятор; 6 – источник питания основного дугового разряда.

В качестве источника напряжения поджига исследовались промышленный осциллятор [12] и специально разработанный высокочастотный высоковольтный осциллятор.

Осцилляторы подключались для запуска плазматрона по последовательной или параллельной схеме. Источник питания поджигающего разряда обеспечивал ток до 20 А, регулируемый балластным сопротивлением, при крутопадающей вольтамперной характеристике ( $U_{xx}$  до 1000 В). Защита источника от высоковольтных высокочастотных импульсов осциллятора осуществлялась конденсатором  $C_{заш.}$

Регистрация осциллограмм токов и напряжений разряда производилось с помощью цифрового запоминающего осциллографа GDS – 820С. В качестве датчиков использовались безиндуктивные шунты и делители напряжений

### 4. Экспериментальные данные

На первом этапе исследований, когда осциллятор подключался непосредственно к катоду и поджигающему электроду разрядного промежутка, изучался ВЧ пробой разрядного промежутка при заполнении его аргоном или воздухом при различных расстояниях между катодом и поджигающим электродом. В этой серии экспериментов изменяемым параметром являлась только величина разрядного промежутка, поэтому здесь определялось максимальное расстояние между катодом и поджигающим электродом, при котором обеспечивалось стабильное возникновение пробоя разрядного промежутка.

В ходе проведенных экспериментов были получены следующие результаты. Стабильный пробой разрядного промежутка в воздушной атмосфере начинается с межэлектродного расстояния  $d$ , равного 1,3 мм. С изменением  $d$  в сторону увеличения от 1,3 мм до 1,8 мм начинает появляться статистическое запаздывание разряда, тем большее, чем больше  $d$ . При  $d$  большем 1,8 мм возникновение разряда практически не наблюдается

Аналогичная картина имеет место и при заполнении разрядного промежутка аргоном при атмосферном давлении. Однако  $d$  в этом случае составляет величину 2,9 мм, и возникновение разряда наблюдается вплоть до  $d$ , равного 3,5 мм. При этом, как и в случае воздушного промежутка, с увеличением  $d$  увеличивается и среднестатистическое время запаздывания возникновения разряда. Оценить напряжение пробоя воздушного разрядного промежутка при атмосферном давлении можно по формуле Ритца:

$$U_{np} = 24,55d + 6,66\sqrt{d}; \quad (1)$$

где  $d$  – межэлектродное расстояние, см;  $U_{np}$  – напряжение пробоя, кВ.

Отсюда

$$d = \left[ \frac{6,66(\sqrt{2,21 \cdot U_{np}} - 1)}{49,1} \right]^2. \quad (2)$$

При амплитудном значении высокочастотных колебаний  $U_{амп} = 15$  кВ, формируемых осциллятором, по формуле (2) имеем  $d = 4,2$  мм. Нами же получено при стабильном зажигании разряда  $d = 1,3$  мм. Отмеченное несоответствие объясняется следующими причинами. Во-первых, при частоте осциллирующих импульсов порядка 4 МГц время приложения столь высокого напряжения не превышает значений порядка  $10^{-7}$  сек. Во-вторых, время формирования лавинно-стримерных разрядов составляет величину  $10^{-5} - 10^{-3}$  сек. Эти обстоятельства, наряду с тем, что приведенная формула Ритца больше справедлива для постоянных напряжений и приводят к отмеченному расхождению.

На втором этапе экспериментов осциллятор включался последовательно с источником поджигающего разряда, обеспечивающем при напряжении холостого хода  $U_{хх} = 1000$  В ток в цепи до 20 А. Поставленной задачей при этом являлось определение минимального напряжения, при котором срабатывание осциллятора приводило к зажиганию основного поджигающего разряда. Поскольку основным рабочим газом плазменного устройства является аргон, исследования проводились именно на этом газе. Расстояние между катодом и поджигающим электродом выставлялось равным 2,5 мм. В ходе экспериментов было определено, что стабильное возникновение при срабатывании осциллятора и дальнейшее самостоятельное горение поджигающего разряда происходит при напряжении 560 В и токе 0,15 А в условиях отсутствия протока аргона.

Поскольку в реальных условиях работы плазменного устройства подача рабочего газа происхо-

дит с определенным расходом и при этом осуществляется его закрутка, то эти два обстоятельства приводят к увеличению длины шнура разряда и обрыву тока. Было определено, что стабильное возникновение и горение поджигающего разряда при номинальных скоростях расхода аргона возможно при начальном напряжении на разрядном промежутке не менее 680 В и токе разряда не менее 0,4 А. При этом наблюдалось увеличение шнура разряда до 30 мм без его обрыва.

В ходе дальнейших исследований было выяснено, что работоспособность системы запуска с использованием осциллятора нарушается, если общее сопротивление водяного охлаждающего контура в цепи катод – поджигающий электрод является меньшим 50 кОм. Обойти возникшую трудность можно, повысив энергию пускового импульса, которая в рассматриваемой схеме составляет величину порядка 0,18 Дж. Однако непосредственно повысить энергию в данной схеме путем повышения напряжения ( $E \sim U^2$ ) не представляется возможным. К недостаткам схемы осциллятора [12] следует отнести также достаточно большое количество используемых элементов, особенно намоточных.

Отмеченные обстоятельства обусловили поиск и разработку новых схем осциллятора, способных при минимальном количестве элементов, особенно намоточных, обеспечить энергию пускового импульса большую 0,2 Дж при необходимом пробивном напряжении и частоте высокочастотных колебаний.

Основные требования при разработке были следующими:

- мощность пускового импульса – не менее 0,2 Дж;
- частота следования пусковых импульсов 50 Гц;
- пробиваемое расстояние - не менее 3 мм;
- надежный пробой разрядного промежутка при наличии сопротивления, шунтирующего промежуток, величиной 50кОм ;
- минимальное количество элементов и их доступность.

Мощность, которую развивает данный осциллятор составляет величину порядка 0,46 Дж, при подаваемом напряжении ~320 В, что более чем в 2,5 раза превышает мощность, которую может развивать осциллятор [12].

Работа данного осциллятора детально исследовалась в различных режимах. На рис. 3 – 5 представлены полученные характерные осциллограммы. Общим для всех осциллограмм являлось следующее. Используемый делитель напряжения имел коэффициент 1:100, напряжение питания, подаваемое на схему, равнялось ~ 270 В, среда в разрядном промежутке – воздушная при атмосферном давлении. Для учета реальных условий эксплуатации осциллятора, когда необходимо брать во внимание шунтирующее действие охлаждающей электроды воды, исследования осциллятора проводились при нагрузке вторичной обмотки импульсного трансформатора шунтирующим сопротивлением величиной 47 кОм.

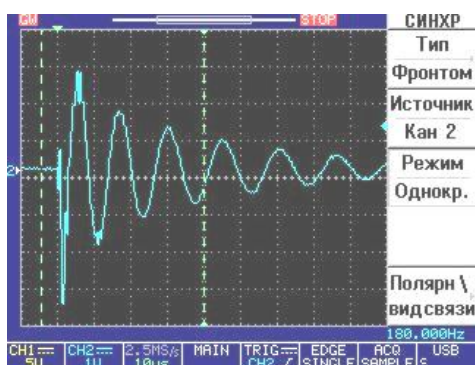


Рис. 3. Характерная осциллограмма напряжения на первичной обмотке импульсного трансформатора

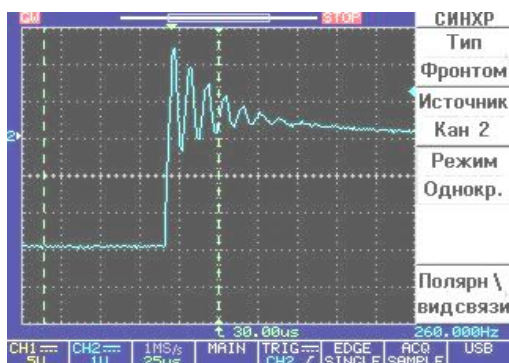


Рис. 4. Характерная осциллограмма напряжения на накопительной емкости

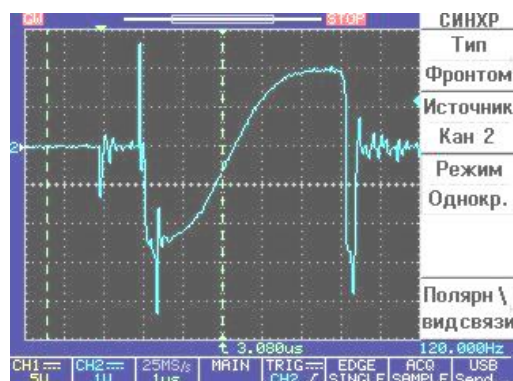


Рис. 5. Характерная осциллограмма напряжения на первичной обмотке импульсного трансформатора при отключенном диоде Д11 (рис. 1)

При обработке нижеприведенных осциллограмм установлено, что частота осцилляций в единичном импульсе составляет величину порядка 100 кГц в отсутствии пробоя. Особенностью схемы является также то, что такие осциллирующие импульсы повторяются с частотой 50 Гц, что повышает надежность инициирования пускового импульса. Напряжение, которое развивает осциллятор на вторичной обмотке импульсного трансформатора, судя по осциллограммам, которые показывают ход кривой напряжения на первичной обмотке импульсного трансформатора при коэффициенте трансформации 1 к 40, составляет величину порядка 15 кВ.

### Выводы

1. Рассмотрены известные методы возбуждения дуги и дан их анализ. Практически исследованы пути повышения эффективности работы схем запуска с использованием импульсных трансформаторов. Приведены схемы устройств запуска, позволяющие полностью устранить снижение тока пускового разряда в первые мгновения его существования.

2. Экспериментально исследованы схемы высокочастотных осцилляторов, обеспечивающих надежное зажигание пускового разряда. Создана и изучена работа схемы осциллятора повышенной мощности, который обеспечивает стабильное зажигание пускового разряда в воздушной среде при расстояниях межэлектродного промежутка  $d$  до 4,0 мм.

3. При срабатывании осциллятора в среде аргона без его протока зажигание поджигающего разряда в межэлектродном промежутке величиной 2,5 мм происходит при напряжении источника питания дежурного разряда 560 В, при этом стабильное горение наблюдается при минимальном токе разряда 0,12 А

4. Проведенное исследование запуска плазмотрона в реальных условиях при подаче аргона с закруткой газового потока показало, что стабильное возникновение поджигающего разряда начинается с напряжения источника питания равного 680 В. Ток разряда при этом должен быть не менее 0,4 А. Такой режим при увеличении длины разрядного шнура газовым потоком до 30 мм не приводит к обрыву разряда. Использование осциллятора для инициирования поджигающего разряда обеспечивает снижение напряжения источника питания дежурного разряда с 3 кВ до 700 В, тем самым переводя устройство в класс установок до 1 000 В, что очень важно с точки зрения электробезопасности обслуживающего персонала.

### Литература

1. Экспериментальные исследования плазмотронов / Под ред. М.Ф. Жуков. – Новосибирск: Наука, 1977. – С. 82-104.

2. Даутов Г.Ю., Дзюба В.Л., Карп И.Н. Плазмотроны со стабилизированными электрическими дугами. – К.: Наука, 1984. – 168 с.

3. Физика и техника низкотемпературной плазмы / Под ред. С.В. Дресвина. – М.: Атомиздат, 1972. – 352 с.

4. Формирование потоков металлической плазмы: Обзор по данным отеч. и зарубеж. печати за 1950-1983 гг. – М.: ЦНИИАтоминформ, 1984. – 83 с.

5. Импульсные плазменные ускорители / В.А. Александров, В.В. Белан, Н.В. Козлов и др. – Х., 1983. – 247 с.

6. Кесаев И.Г. Катодные процессы электрической дуги. – М.: Наука, 1968. – 244 с.

7. Сысоев Ю.А. Высокорекурсивные пусковые инжекторы для источников плазмы электротехнологических установок // Новые электротехнологические процессы в машиностроении: Всесоюз. семинар. – Кишинев. – 1990. – С. 75.

8. Сысоев Ю.А. О перспективах создания высоконадежных импульсных источников плазмы для электротехнологических установок // Новые электротехнологические процессы в машиностроении: Всесоюз. семинар. – Кишинев, 1990. – С. 78.

9. Сливков И.Н. Процессы при высоком напряжении в вакууме. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.

10. Справочник сварщика / Под ред. В.В. Степанова. – М.: Машиностроение, 1974. – 430 с.

11 Патент США № 3876855 кл. 219-131, 1975.

12. Фролов В.В. Дуговая сварка алюминия: Справ. пособие. – Х.: ИЦ «Технология», 2003. – 296 с.

*Поступила в редакцию 1.06.2006*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.И. Оранский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.