

УДК 533. 915

© 2012 г. ГОНЧАРЕНКО Р.Б., КИСЕЛЕВ А.А., РУТБЕРГ А.Ф., САФРОНОВ А.А.

### ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ТРЕХФАЗНЫХ ПЛАЗМОТРОНОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Показано, что характеристики системы электропитания плазмотрона переменного тока должны обеспечивать статическую устойчивость рабочей точки на вольт-амперной характеристике плазмотрона и способствовать его работе в режиме диффузного разряда, а для обеспечения динамической устойчивости дуги плазмотрона его система электропитания должна обладать фильтрующими свойствами относительно высших гармонических тока плазмотрона. Указанным требованиям удовлетворяют разработанные в ИЭЭ РАН системы питания трехфазных плазмотронов с рельсовыми электродами, изготавливаемые на номинальные токи 180, 500, 1000, 1200, 1500 и 1800 А. Перспективным является широтно-импульсное регулирование тока плазмотрона с помощью полупроводникового преобразователя с промежуточным звеном постоянного тока, включающего неуправляемый диодный выпрямитель и инвертор на IGBT или IGBT.

В последние годы наряду с плазмотронами постоянного тока в различного рода плазмохимических технологиях широко используются трехфазные плазмотроны переменного тока [1]. Первоначально появление плазмотронов переменного тока было вызвано отсутствием надежных и дешевых выпрямительных устройств, как правило используемых в системах питания плазмотронов постоянного тока. Отсутствие выпрямительных устройств в системах электропитания на первом этапе появления плазмотронов переменного тока — их преимущество перед плазмотронами постоянного тока. Выяснилось, поскольку в электродуговых плазмотронах переменного тока электроды периодически меняют свою полярность — поочередно работают анодом и катодом — за счет выбора материала электродов и их режима работ удается существенно снизить износ электродов по сравнению с износом электродов в плазмотронах постоянного тока.

При относительно простой структуре систем электропитания трехфазных плазмотронов переменного тока к ним предъявляются специфические требования, определяемые достаточно сложными физическими процессами, происходящими в питаемых плазмотронах. Эти требования рассматривались в работах [1–3].

В данной статье авторы на основе проведенных исследований и разработок уточняют, анализируют и обобщают результаты исследования систем электропитания трехфазных плазмотронов переменного тока [1].

Неустойчивости электрической дуги трехфазного плазмотрона оказывают влияние на его работу [3]. В значительной мере характер этих неустойчивостей и возможности воздействия на них определяются системой электропитания плазмотрона.

Классической неустойчивостью, на которую в первую очередь влияет система электропитания, является неустойчивость рабочей точки на вольт-амперной характеристике плазмотрона. Дуга постоянного тока в большинстве случаев имеет падающую вольт-амперную характеристику и в идеальном случае при питании дуги от источника напряжения в ней устанавливается бесконечно большой ток.

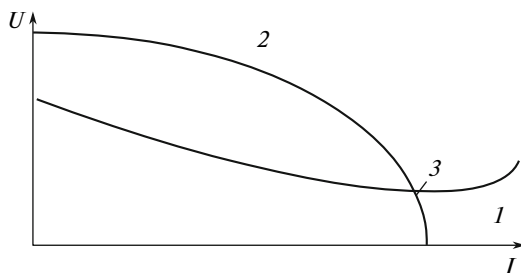


Рис. 1. Вольтамперная характеристика дуги  $I$  и внешняя характеристика источника питания 2

При постоянном напряжении для стабилизации тока дуги последовательно с дугой обычно включают балластное активное сопротивление, при этом внешняя характеристика питающего дугу источника напряжения приближается к характеристике источника тока, и ток дуги стабилизируется в некоторой рабочей точке. Для дуги постоянного тока условия статической устойчивости рабочей точки на внешней характеристике известны, см., например, [4].

При переменном напряжении для стабилизации тока дуги обычно последовательно с дугой включают индуктивное сопротивление, что позволяет повысить КПД установки за счет исключения потерь в балластном активном сопротивлении. В случае использования индуктивного сопротивления внешняя характеристика источника питания представляет собой параболу, определяемую как

$$U^2 + x^2 I^2 = E^2, \quad (1)$$

где  $E$ ,  $U$  — действующие значения ЭДС источника питания и напряжения электрической дуги;  $I$  — действующее значение тока электрической дуги;  $x$  — реактивное сопротивление источника питания. На рис. 1 показана вольт-амперная характеристика электрической дуги  $I$  и внешняя характеристика источника питания 2. Введение дополнительного реактивного сопротивления в цепь источника питания приближает внешнюю характеристику питающего дугу источника к характеристике источника тока, и ток дуги стабилизируется в некоторой рабочей точке 3. При этом электрическая энергия потребляется от источника  $E$  с коэффициентом мощности

$$\cos \varphi = U/E. \quad (2)$$

В современных плазматронах переменного тока удается обеспечить их устойчивую работу на участке как падающей, так и возрастающей вольт-амперной характеристики.

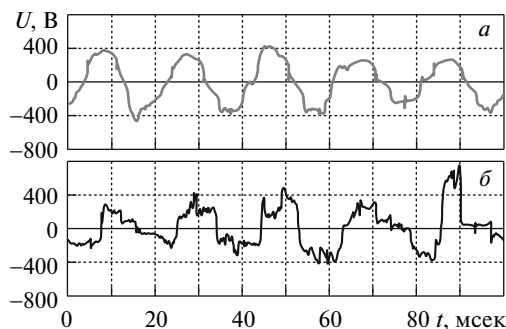
В большинстве случаев в технологических установках плазматроны используются для получения нагретого газа со среднемаховой температурой 1500–2500 К. При давлениях газа близких к атмосферному наиболее вероятно возникновение контрагированного режима протекания тока через газ. В этом режиме площадь шнура разряда близка к площади эмитирующей поверхности электрода и при разряде в азоте и токе 4–5 кА может равняться  $\sim 1 \text{ см}^2$  [5]. При этом температура в контрагированном разряде может превышать 15000 К. При контрагированном разряде теплоотдача от дуги определяется в основном излучением и конвекцией, причем доля энергии излучения, достигающей стенки плазматрона оказывается значительной. Как показано в [4], в плазматронах возможно и целесообразно реализовать режим диффузного разряда. В диффузном режиме проводящие свойства плазмы определяются ионизацией паров материала электродов. При выборе специальной конструкции камеры плазматрона за счет создания высокой турбулентности газа в камере удастся существенно увеличить концентрацию паров металла материала электродов в значительном объеме камеры плазматрона и обеспечить электропроводность плазмы в большем объеме камеры. В диффузном режиме в условиях

плазмотрона по [5] и токе 3–5 кА площадь разряда может равняться примерно  $\sim 50$  см<sup>2</sup>. При этом температура в диффузном разряде не превышает 4000–7000 К, теплоотдача от зоны разряда определяется в основном турбулентной теплопроводностью и конвекцией, доля энергии, достигающей стенки плазмотрона оказывается незначительной и КПД нагрева газа в плазмотроне повышается. Испытания показали, что КПД плазмотрона с диффузным разрядом типа ЭДП мощностью до 10 МВт достигает 90% [5].

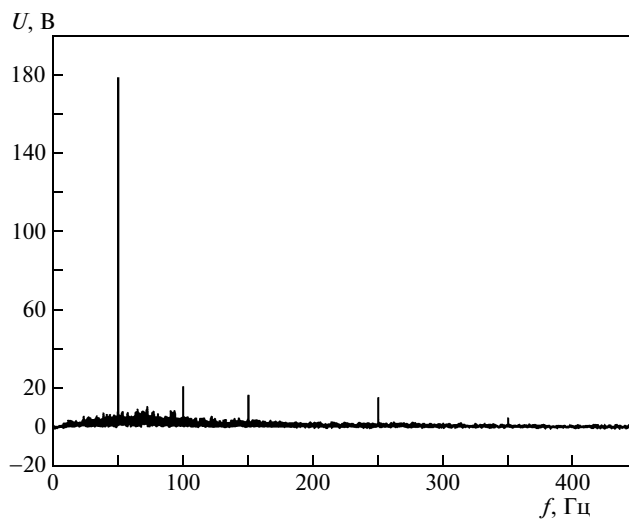
В [1, 2] было показано, что в плазмотроне переменного тока для увеличения его КПД целесообразно создать высокочастотные неустойчивости электрической дуги, что приводит к горению дуги в диффузно-турбулентном режиме и соответствующему снижению ее температуры, а значит, к уменьшению потерь на излучение дуги. Такой режим работы плазмотрона достигается за счет выбора специальной конструкции плазмотрона и соответствующих характеристик его системы электропитания. В современных трехфазных плазмотронах переменного тока организован вихревой обдув дуги рабочим газом, а дуга перемещается по электродам под действием электродинамических сил или внешних специально созданных магнитных полей. В некоторых конструкциях плазмотронов дуга в процессе ее перемещения по электродам одновременно растягивается за счет выбора специальной конфигурации электродов плазмотрона. При этом средняя скорость перемещения дуги по электродам плазмотрона составляет  $\sim 10$  м/сек. В процессе развития аэродинамических неустойчивостей дуги, вызванных ее вихревым обдувом рабочим газом, дуга, поскольку она имеет весьма незначительную массу, ускоряется до скоростей, превышающих на порядок и более ее среднюю скорость. Кроме аэродинамических неустойчивостей, возникают магнитогидродинамические неустойчивости дуги, вызванные воздействием на нее ее собственного магнитного поля. Эти неустойчивости вызываются тем, что по мере удаления от электрической дуги ее собственное магнитное поле уменьшается и уменьшается магнитное давление этого поля, воздействующее на электрическую дугу. Эксперимент показывает, что в разработанных в ИПЭФ РАН плазмотронах переменного тока в напряжении на зажимах плазмотрона существуют как относительно низкочастотные гармонические (3-я, 5-я и т.д.), вызванные нелинейностью вольт-амперной характеристики дуги, так и сильно выраженные высокочастотные гармонические [1].

При работе на азоте или воздухе в напряжении плазмотрона появляются гармонические с частотами 1,4–2 и 8–12 кГц, при работе плазмотрона на водороде появляются гармонические напряжения с частотами 6–7 и 25–30 кГц. Эти колебания напряжения на дуге плазмотрона являются следствием колебаний столба разряда, которые наряду с другими факторами способствуют диффузно-турбулентному режиму горения дуги и улучшению теплообмена между дугой и рабочим газом. Полезные для работы плазмотрона колебания напряжения на дуге не должны вызывать существенных колебаний тока дуги, поскольку высокочастотные колебания тока плазмотрона могут вызвать лавинное нарастание неустойчивостей газового разряда в плазмотроне и привести к потере динамической устойчивости дуги. Известно, что скорость нарастания тока в электрической дуге может достигать  $10^8$ – $10^9$  А/сек и более [1]. Эксперимент показывает, что в плазмотронах переменного тока мощностью до 1 МВт скорость нарастания тока не должна превышать  $10^5$ – $10^6$  А/сек. Система электропитания плазмотрона переменного тока должна иметь такие характеристики, чтобы обеспечивалось снижение скорости нарастания тока плазмотрона до необходимой величины и соответствующее подавление высших гармонических в токе плазмотрона. В простейшем случае такими характеристиками обладает балластное индуктивное сопротивление – реактор.

Параметры реактора должны быть выбраны такими, чтобы были обеспечены статическая и динамическая устойчивости дуги плазмотрона. Для работы в системе питания плазмотрона реактор должен иметь достаточно высокое сопротивление как на частоте первой гармонической сети, так и при указанных выше, обусловленных колебаниями столба разряда частотах. Если не принять соответствующих мер при проектировании реакторов системы питания плазмотрона, на повышенных частотах,



**Рис. 2.** Характерные осциллограммы напряжений на дугах плазмотрона с рельсовыми электродами при работе на воздухе: *a* – расход газа 10 г/сек; *б* – 30 г/сек



**Рис. 3.** Спектральная характеристика напряжения трехфазного плазмотрона с рельсовыми электродами. Расход рабочего газа – 30 г/сек (воздух), мощность – 130 кВт

обусловленных колебаниями столба разряда плазмотрона, индуктивное сопротивление реактора будет шунтироваться заметными по величине паразитными межвитковыми емкостями реактора, что может привести к ухудшению работы плазмотрона. При проектировании магнитопровода и обмоток реактора также следует учитывать наличие высокочастотных составляющих в напряжении и токе реактора. Высокочастотные составляющие напряжения реактора вызывают появление добавочных потерь в стали магнитопровода, а высокочастотные составляющие тока реактора вызывают появление добавочных потерь в проводниках обмотки реактора. Уменьшение уровня высших гармонических в токе плазмотрона необходимо также для обеспечения требований по электромагнитной совместимости плазмотронов с другим оборудованием.

Типичные для плазмотронов переменного тока осциллограммы напряжений при различных расходах плазмообразующего газа приведены на рис. 2. Из приведенных осциллограмм видно, что формы кривых сильно искажены и отличаются от синусоидальных, причем с увеличением расхода это отличие усиливается.

Колебания напряжения с частотой 1–6 кГц могут быть объяснены распространением звуковых волн. Флуктуации напряжения с частотой 8–30 кГц, по-видимому, вызваны колебаниями столба разряда. Следует отметить, что с ростом тока растет частота

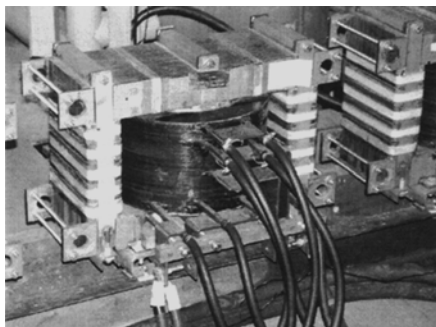


Рис. 4. Внешний вид токоограничивающего реактора

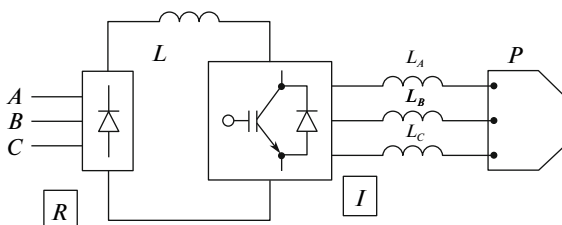


Рис. 5. Схема питания трехфазного плазмотрона с диодным выпрямителем и инвертором на IGBT

колебаний, отождествляемых со звуковыми, так как растет температура дуги. В частности, при росте тока от 50 до 500 А (рабочий газ — аргон) частота колебаний изменяется от 0,6 до 1 кГц [1].

Разложение приведенных осциллограмм в ряд Фурье выявляет спектр частот отличных от первой гармоники рис. 3.

В ИЭЭ РАН разработаны системы питания трехфазных плазмотронов с рельсовыми электродами на номинальные токи 180, 500, 1000, 1200, 1500 и 1800 А.

Конструктивно системы питания состоят из токоограничивающих индуктивностей, сильноточной коммутационной аппаратуры, схемы компенсации реактивной мощности и автоматики системы управления. В систему входит источник питания для высоковольтного однофазного плазмотрона переменного тока с торцевыми электродами, предназначенного для создания концентрации электронов  $n_e \sim (10^{13} \div 10^{14}) \text{ см}^{-3}$ , достаточной для стабильного поджига основных дуг. Токоограничивающие индуктивности (реакторы) применяемые в представленной системе питания, показаны на рис. 4.

Реактор выполнен на сердечнике из шихтованной электротехнической стали с немагнитными зазорами и медной обмоткой. Сердечник для уменьшения рассеяния магнитного потока выполнен с несколькими немагнитными зазорами, распределенными по высоте вертикальных стержней. Для уменьшения габаритов и увеличения плотности тока реактор имеет водяное охлаждение. Индуктивность реактора регулируется ступенчато посредством переключения перемычек.

Многофазные электродуговые плазмотроны переменного тока с рельсовыми электродами питаются от низковольтного (480В) источника переменного тока, минимальное межэлектродное расстояние может изменяться в процессе работы от 8 до 20 мм, в котором при нормальных условиях самостоятельная инициация дуги невозможна. Для обеспечения стабильной инициализации дуги и обеспечения устойчивой работы плазменной системы в систему питания включён источник питания высоковольтного однофазного электродугового плазмотрона — инжектора. В настоящее время в качестве ин-

жектора используются различные однофазные высоковольтные плазмотроны с торцевыми электродами. Система управления источника питания создана на основе промышленного микроконтроллера Advantech, который позволяет в реальном времени производить анализ осциллограмм тока и напряжения, вычислять мгновенные и действующие значения токов, напряжения и мощности. Для измерения мгновенных значений токов и напряжений система питания укомплектована датчиками тока и напряжения.

Существенно уменьшить массу системы питания трехфазного плазмотрона можно при использовании схемы рис. 5 на основе выключаемых тиристоров с интегрированным затвором (IGCT) или биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT). В схеме рис. 5 сетевой ток, поступающий через зажимы  $A, B, C$ , выпрямляется неуправляемым выпрямителем  $R$ , фильтруется дросселем  $L$  и преобразуется в трехфазный ток необходимой частоты и формы с помощью инвертора  $I$  на биполярных транзисторах с изолированным затвором. Необходимая форма тока плазмотрона достигается за счет широтно-импульсной модуляции выходного напряжения инвертора. Высокая частота широтной модуляции (до 500 Гц для IGCT и 50 кГц для IGBT) позволяет использовать на выходе инвертора сравнительно малогабаритные фильтрующие индуктивности  $L_A, L_B, L_C$ .

**Выводы.** 1. Характеристики системы электропитания плазмотрона переменного тока должны обеспечивать статическую устойчивость рабочей точки на вольт-амперной характеристике плазмотрона.

2. Характеристики системы электропитания плазмотрона переменного тока должны способствовать его работе в режиме диффузного разряда.

3. Полезные, с точки зрения снижения температуры дуги плазмотрона и улучшения теплообмена с окружающим газом, высокочастотные колебания напряжения плазмотрона не должны вызывать существенных колебаний тока плазмотрона, поскольку высокочастотные колебания тока плазмотрона могут привести к потере динамической устойчивости дуги плазмотрона.

4. Для обеспечения динамической устойчивости дуги плазмотрона его система электропитания должна обладать фильтрующими свойствами относительно высших гармонических токов плазмотрона.

5. Разработанные в ИЭЭ РАН системы питания трехфазных плазмотронов с рельсовыми электродами изготавливаются на номинальные токи 180, 500, 1000, 1200, 1500 и 1800 А.

5. Перспективно широтно-импульсное регулирование тока плазмотрона с помощью полупроводникового преобразователя с промежуточным звеном постоянного тока, включающего неуправляемый диодный выпрямитель и инвертор на IGBT или IGCT.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Гранты № 11-08-01022-а, 10-08-90445-Укр\_а.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Rutberg Ph.* Physics and Technology of High-Current Discharges in Dense Gas Media and Flows. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2009. 214 p.
2. *Рутберг Ф.Г., Сафронов А.А., Гончаренко Р.Б., Кузнецов В.Е.* К вопросу о влиянии неустойчивости электрической дуги трехфазного плазмотрона переменного тока на его работу // Изв. РАН. Энергетика 1996. № 4. С. 114–120.
3. *Рутберг Ф.Г., Сафронов А.А., Гончаренко Р.Б. и др.* Специфические особенности систем электропитания промышленных трехфазных плазмотронов переменного тока // Изв. РАН. Энергетика. 1998. № 1. С. 93–99.
4. *Рюденберг Р.* Эксплуатационные режимы электроэнергетических систем и установок. Л.: Энергия, 1981.
5. *Рутберг Ф.Г., Сафронов А.А., Горячев В.Л., Рутберг А.Ф.* Мощные плазмотроны переменного тока // Изв. РАН. Энергетика. 1998. № 1. С. 80–92.