

СОВМЕСТНОЕ ГОРЕНИЕ СИЛЬНОТОЧНОЙ И ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ДУГ В ПЛАЗМОТРОНЕ

В. А. Богатырева, Н. И. Воробьева, М. Ф. Жуков, Ю. И. Сухинин

(Новосибирск)

Рассмотрены некоторые вопросы совместного горения в плазматроне вихревой схемы двух дуг: сильноточной переменного тока и «дежурной» высокочастотной с частотой $f \geq 1$ мГц. Показано, что в этом случае силовая дуга горит без пауз тока с $\cos \varphi \approx 1$. Получено при определенных условиях синусоидальное изменение напряжения и тока дуги во времени. На этих же режимах осуществлено регулирование тока силовой дуги путем изменения мощности вч-дуги.

1. В существующих генераторах низкотемпературной плазмы (плазматронах), использующих сильноточную электрическую дугу переменного тока в качестве источника тепловой энергии, поддержание ее непрерывного (беспаузного) горения обеспечивается включением в цепь питания соответствующей индуктивности. При этом значение $\cos \varphi$ сети невелико и не превосходит 0.6—0.7.

В связи с этим, возникает задача о создании в камере горения дуги переменного тока таких физических условий, при которых сильноточная дуга не только горела бы непрерывно без индуктивности в цепи, но и обеспечивала бы при определенных условиях синусоидальное изменение напряжения. Такие условия мыслимы, если, например, между электродами плазматрона заставить гореть одновременно, кроме основной сильноточной дуги, еще вспомогательную высоковольтную, но слаботочную дугу постоянного тока. Физически совершенно ясно, что в этом случае в рабочем пространстве плазматрона в любой момент времени будет существовать электропроводящий канал, по которому может непрерывно во времени развиваться сильноточный дуговой разряд. Организовать горение вспомогательной дуги не представляет трудностей. Сложность состоит в развязке сетей постоянного и переменного тока.

Учитывая вышеизложенное, рассматривается возможность использовать в качестве вспомогательной дуги высокочастотный и высоковольтный разряд, назначение которого, в первую очередь, — обеспечивать в любой момент времени существование в камере горения дуги электропроводящего канала, по которому должен развиваться сильноточный разряд. Легко показать, что защита сильноточных источников питания как постоянного, так и переменного тока от напряжения высокой частоты в этом случае осуществима при любых мощностях сильноточного разряда.

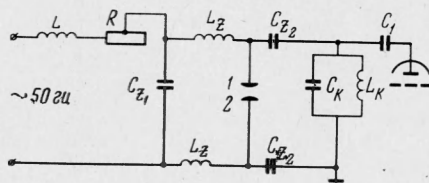
2. Частота вспомогательного разряда определяется временем деионизации газа после прекращения подвода энергии к столбу дуги. По данным ряда авторов [1] для дуг, свободно горящих в воздухе, время деионизации колеблется в пределах 10^{-3} — 10^{-4} сек. Если дуга горит в канале с протоком газа, это время будет еще меньше. Нами экспериментально установлено, что при частотах, порядка 10^6 гц, в плазматроне с газовой вихревой стабилизацией и осевым обдувом высокочастотной дуги последняя горит устойчиво и непрерывно. При меньших частотах наблюдаются обрывы (угасания) дуги.

Таким образом, для поддержания непрерывного горения сильноточной дуги переменного тока промышленной частоты, по всей видимости, достаточно, чтобы генератор, питающий вспомогательную дугу, генерировал напряжение с частотой порядка 1 мГц.

Опыт показывает, что вспомогательная дуга, мощностью в несколько киловатт, обеспечивает стабильное и бесперебойное горение сильноточной дуги переменного тока в плазматронах с газовой вихревой стабилизацией в достаточно широком диапазоне изменения токов и расходов газа.

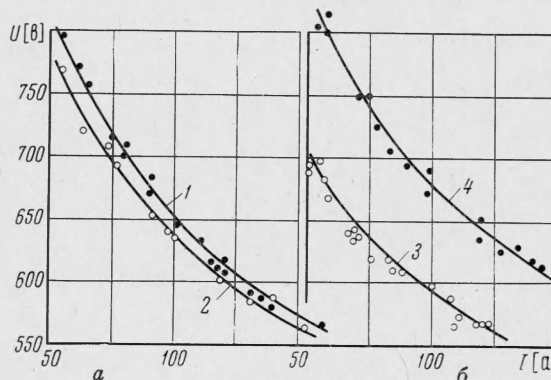
При использовании вч-дуги высокого напряжения возникает естественное желание использовать ее и как средство для начального поджига. В реально осуществимых схемах осевых плазматронов минимальный межэлектродный зазор, определяемый расходом газа и допустимыми радиальными скоростями, составляет 4—7 мм. Для начального электропробоя этого промежутка необходимо, чтобы напряжение зажигания достигало 20—30 кВ. Как будет показано далее, небольшим усложнением электрической схемы питания можно повысить напряжение холостого хода вч-генератора до требуемых величин.

3. На фиг. 1 показана принципиальная схема подключения к плазматрону двух источников питания — сильноточного и высокочастотного низкоамперного. К электродам плазматрона 1, 2 напряжение (для дуги) от мощного источника питания подается в общем случае через индуктивность L , добавочное омическое сопротивление R и воз-



Фиг. 1

душные индуктивные катушки L_z ; вч-генератор подсоединяется через конденсаторы C_{z_2} , предохраняющие закорачивание силового источника питания через воздушную катушку L_k колебательного контура генератора. Емкости C_{z_2} одновременно выполняют еще и роль ограничителей величины высокочастотного тока, протекающего через плазмотрон. Индуктивности L_z и емкость C_{z_1} образуют делитель высокочастотного напряжения, пропускающий в силовой источник электропитания напряжение, равное падению напряжения на конденсаторе C_{z_1} . В случае необходимости, например, для обеспечения начального поджига, напряжение вч-генератора можно увеличить в несколько раз, выбрав конденсатор C_{z_2} и индуктивность L_z такими, чтобы получить последовательный резонанс (резонанс напряжений). При возникновении дугового разряда между электродами условие последовательного резонанса нарушается, и питание дуги осуществляется выходным напряжением генератора. При угасании разряда условие пробоя автоматически восстанавливается, если обрыв дуги не связан с нарушением работы вч-генератора.

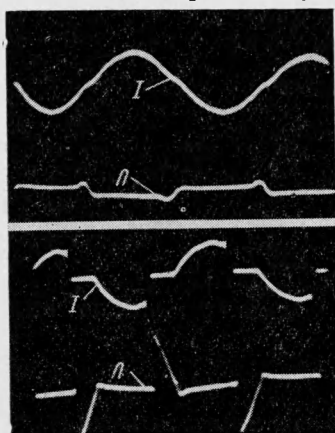


Фиг. 2

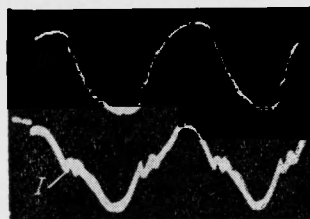
Таким образом, подключение высокочастотного генератора к плазмотрону по схеме, показанной на фиг. 1, должно обеспечивать не только бесперебойность горения дуги переменного тока, но и начальный поджиг.

4. В рассматриваемых ниже экспериментах, при раздельном горении высокочастотной и силовой дуг, длина последней меньше. Таким образом, можно предполагать, что в данном конкретном случае, так как мощность вч-дуги незначительна по сравнению с силовой дугой и ее энергетический вклад невелик, физические условия в камере горения дуги останутся практически неизменными и будут определяться силовой дугой. Вольтамперные характеристики дуги пере-

менного тока, полученные в результате измерений, приведены на фиг. 2 для $p = 1$ бар, $d = 20$ мм: кривая 1 $G = 7.45$ г/сек, с индуктивностью, но без вч-дуги; кривая 2 $G = 7.45$ г/сек, с индуктивностью и вч-дугой; кривая 4 $G = 9.15$ г/сек, без индуктивности, но с вч-дугой, кривая 3 $G = 9.15$ г/сек, без индуктивности и вч-дуги.



Фиг. 3

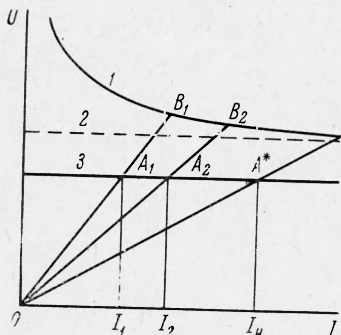


Фиг. 4

Эксперимент показывает, что вольтамперные характеристики силовой дуги переменного тока (в бесперебойном режиме, например, за счет включения индуктивности) как в сопровождении вч-дуги, так и без сопровождения мало отличаются одна от другой (кривая 1 и 2, фиг. 2, а). Характеристика 2, снятая при включенной вч-дуге, немного ниже характеристики дуги 1, горящей без сопровождения вч-дуги. При малых мощностях ($I \approx 50$ а) отклонение по мощности не превосходит 4%, при больших

($I \approx 150$ а) — меньше 2%, что примерно соответствует приросту тока от вч-дуги. С ростом силового тока вч-дуга, естественно, еще слабее изменяет вольт-амперные характеристики. Заметим, что при изменении силового тока дуги (изменение сопротивления нагрузки от 0 до 10^3 ом), отдаваемый вч-генератором ток изменялся не более чем на 20%, так как последний работал на дугу в режиме генератора тока.

Совершенно иная картина наблюдается при горении дуги с паузами тока (фиг. 2, б). Кривая 3 соответствует горению дуги без включенной вч-дуги и с паузами тока, кривая 4 — с включенной высокочастотной дугой. В обоих случаях индуктивности в цепи не было. Расход газа через плазмотрон равнялся 9.15 г/сек. Причины столь существенной разницы в $U - I$ характеристиках легко понять, рассмотрев осциллограммы напряжения и тока (без индуктивности) для этого случая, представленные на фиг. 3, а без вч-дуги, а на фиг. 3, б с вч-дугой. Включение вч-разряда устраняет паузы тока и повышает, тем самым, эффективное напряжение сильноточной дуги, что и отражено в характеристиках. Таким образом, опыт показал, что при совместном горении высоко частотной и сильноточной дуг обеспечивается бесперебойное непрерывное горение последней без индуктивности в цепи, при $\cos \varphi$ близком к единице. При этом напряжение дуги меньше амплитудного значения напряжения источника питания.



Фиг. 5

Как видно из фиг. 2, вольт-амперные характеристики дуги переменного тока — падающие. Поэтому, чтобы дуга горела устойчиво, необходимо выполнение условий устойчивости. В наших экспериментах устойчивость достигалась введением в цепь дуги балластного сопротивления. Однако анализ показывает, что при определенных условиях, при помощи вч-дуги можно обеспечить не только непрерывное, но и устойчивое горение дуги в отсутствие балластного сопротивления. В этом случае динамические характеристики тока и напряжения в полупериоде близки к синусоидам, при полном использовании мощности источника питания.

5. Если статическая вольт-амперная характеристика дуги переменного тока в рабочем интервале токов такова, что выполняется условие $U > U_m \sin \omega t$, то дуга в плазмотроне самостоятельно гореть не может, так как в любой момент времени располагаемое напряжение ниже требуемого. При включении вч-дуги силовая дуга должна существовать, а ее напряжение U — следовать как по величине, так и по форме за располагаемым напряжением источника, т. е. оно должно быть синусоидальным. Назовем такой дуговой разряд несамостоятельным. В этом случае располагаемая мощность источника питания может быть использована полностью. Экспериментальная проверка возможности существования синусоидальных динамических характеристик по току и напряжению проводилась на однофазном плазмотроне с заранее рассчитанным самостоятельным режимом горения дуги $U = 400$ в при $I = 240$ а, который мог быть осуществлен в плазмотроне с диаметром выходного электрода 30 мм, расходом воздуха 7 г/сек, давлением 1 бар. Плазмотрон подключался к сети переменного тока с напряжением 380 в ($U_m = 537$ в) промышленной частоты через добавочное активное сопротивление 0.6 ом, снижавшее отдаваемое сетью напряжение до величины значительно меньшей, чем напряжение, необходимое для самостоятельного горения электрической дуги.

Эксперимент показал: дуга горит на выбранном режиме только при включенной вч-дуге, в динамике напряжение и ток изменяются примерно синусоидально (фиг. 4).

В приведенном эксперименте мощность сильноточного дугового разряда достигла 52 кВт ($U = 217$ в), вч-дуги — 0.75 кВт. Расчеты электрической цепи (с учетом сопротивления подводящих кабелей) указывают на хорошее соответствие расчетных и измеренных величин по напряжению.

Подобный режим горения сильноточной дуги осуществлен также на плазмотроне с рабочим газом-аргоном. Фазный плазмотрон с внутренним диаметром выходного электрода 50 мм при расходе аргона 110 г/сек был подключен непосредственно к сети 380 в, с номинальным током $I = 2400$ а. При токе дуги $I = 1500$ а напряжение самостоятельно горящей дуги равнялось 270 в. Добавочное сопротивление, определяемое сопротивлением подводящих кабелей и воздушного дросселя, служащего для защиты сети 50 гц от высокочастотного напряжения вч-генератора, понижало располагаемое напряжение до 200 в. Напряжение несамостоятельного дугового разряда равнялось этой же величине. При мощности дугового разряда 300 кВт потребная мощность вч-дуги не превышала 4 кВт, т. е. была немногим более 1%.

Итак, при условии, когда (фиг. 5) статическая вольт-амперная характеристика (кривая 1) самостоятельно горящей дуги лежит выше амплитудных значений (кривая 2)

напряжения источника питания (кривая 3 — эффективное напряжение) при совместном горении высокочастотной и сильноточной дуг возможно устойчивое горение последней без балластного сопротивления при 100% использовании мощности источника питания и синусоидальном изменении напряжения и тока. Если напряжение источника изменять непрерывно, сохраняя неизменной величину высокочастотного тока, можно ожидать, что вольт-амперной характеристикой несамостоятельно горящей дуги будет одна из кривых *OB*.

При работе плазмотрона с несамостоятельно горящей дугой возможно также регулирование вкладываемой в силовую дугу мощности путем изменения протекающего через нее тока от вч-генератора. Увеличивая мощность вспомогательной дуги, можно довести ток силовой дуги до номинального значения. В этом случае и будет 100% использование мощности источника питания.

По-видимому, такая регулировка возможна как на плазмотронах переменного, так и постоянного токов. Первые опыты показали, что в плазмотронах с вихревой аргонной стабилизацией изменение мощности вч-дуги с 2 до 4 *квт* увеличивает ток дуги от 240 до 2500 *а* (расход газа 110 *г/сек*).

Поступила 22 VIII 1967

ЛИТЕРАТУРА

1. З а л е с с к и й А. М. Электрические аппараты высокого напряжения. Госэнергоиздат, 1957.

ДРЕЙФОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В РАЗРЕЖЕННОЙ И ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЕ

Н. С. Бучельникова, Р. А. Салимов, Ю. И. Эйдельман

(Новосибирск)

Исследована дрейфовая неустойчивость при переходе от разреженной ($\lambda_{ei} \geq L$) к плотной ($\lambda_{ei} < L$) плазме. Найдено, что амплитуда колебаний и коэффициент диффузии не зависят от плотности. Характер диффузии и зависимость $D(H)$ одинаковы в разреженной и плотной плазме. В отсутствие неустойчивости диффузия классическая. Исследовано затухание гармоник неустойчивости при изменении магнитного поля. Показано, что затухание гармоник при увеличении магнитного поля может быть объяснено сносом возмущений за счет дрейфа в системе с холодным торцом. Затухание второй гармоники при уменьшении магнитного поля, по-видимому, определяется стабилизацией неустойчивости за счет ион-ионных столкновений.

В последние годы дрейфовая неустойчивость неоднородной по плотности плазмы интенсивно исследовалась теоретически [1,2] и экспериментально [3-11]. В согласии с теорией эксперименты показали, что неустойчивость проявляется в возбуждении косых волн типа $A(x) \exp i(\omega t + k_y y + k_z z)$ при $k_y \gg k_z$, распространяющихся в сторону электронного диамагнитного дрейфа. Частота возбуждаемых колебаний близка к дрейфовой

$$\omega_* \approx k_y \frac{cT}{eH} \frac{n'}{n}$$

Здесь k_z , k_y — параллельная и перпендикулярная магнитному полю H составляющие волнового вектора; T — температура электронов; n , n' — плотность плазмы и ее градиент.

Значительная часть экспериментальных работ [3-7] посвящена исследованию дрейфовой неустойчивости в плотной плазме, когда длина свободного пробега относительно электрон-ионных столкновений λ_{ei} много меньше длины системы L . В этих экспериментах $L \sim 100$ *см*, $n \sim 10^{11} - 10^{12}$ *см*⁻³. Детальное сравнение [8] дает хорошее согласие эксперимента с теорией дрейфово-диссипативной неустойчивости.

Ряд экспериментов [8-11] выполнен в случае разреженной (бесстолкновительной) плазмы, когда $\lambda_{ei} \geq L$ ($L \sim 40$ *см*, $n \sim 10^9 - 10^{10}$ *см*⁻³). В этом случае исследована сама неустойчивость, турбулентное состояние плазмы при развитой неустойчивости, измерены амплитуда колебаний A и коэффициент диффузии D , а также найдены зависимости $A(H)$ и $D(H)$. В работах [8,10] показано, что характер неустойчивости сохраняется при переходе в область плотной плазмы $\lambda_{ei} < L$ ($L \sim 40$ *см*, n до $5 \cdot 10^{11}$ *см*⁻³).

Действительно, сохраняются частоты колебаний, тип волны, направление их распространения. Однако изменения A и D при изменении плотности не были исследо-