

УДК 537.527

Анализ динамических условий устойчивости электрической дуги в канале плазмотрона

К. А. Корсунов, Г. С. Калюжный, Е. Ю. Лыштва

Проведен анализ динамических условий устойчивости электрической дуги в канале плазмотрона. Показано, что из известных трех динамических условий устойчивости независимыми являются два. Предложен критерий, позволяющий определить область значений параметров схемы питания плазмотрона, в которой учет динамических свойств дуги становится необходимым.

PACS: 52.75.Nn

Ключевые слова: электрическая дуга, плазмотрон, источник питания, устойчивость, характеристики, критерий

Введение

В настоящее время электродуговые генераторы низкотемпературной плазмы (плазмтроны) нашли достаточно широкое применение в различных отраслях науки и производства. Однако для использования плазмтронов в конкретном технологическом процессе необходимо знать взаимосвязь параметров работы плазмтрона (род и массовый расход плазмообразующего газа, давление на срезе сопла, сила тока дуги и др.) с характеристиками генерируемой плазменной струи.

Подходы и методики расчета характеристик электродуговых плазмтронов приведены, например, в работах [1—4] и ряде других. При этом как на этапе конструирования электродуговых плазменных установок, так и при выборе режима их эксплуатации неизбежно возникает задача определения области устойчивости электрической дуги. Большинство известных работ, связанных с расчетом устойчивости плазмтрона как элемента электрической цепи, основано на применении статической вольт-амперной характеристики дуги [1, 4]. Такой подход к решению задачи устойчивости дуги не учитывает динамические свойства электрической дуги. Одной из первых работ, в которой были исследованы динамические характеристики дуги в потоке газа при возмущении электрических

параметров цепи питания плазмтрона, является работа [5]. Однако работы, в которых учитывалось бы влияние возмущений электрических параметров на устойчивость работы плазмтрона и были бы предложены подходы к расчету параметров электрической цепи, обеспечивающих повышение устойчивости горения дуги в системе «источник питания—плазмтрон», практически отсутствуют.

Учитывая вышесказанное, целью данной работы является анализ динамических условий устойчивости электрической дуги в канале плазмтрона.

Постановка задачи

Основной метод исследования устойчивости электрической дуги заключается в определении условий, при которых малые возмущения тока или напряжения, наложенные на дугу в рассматриваемой рабочей точке, с течением времени затухают. Для этого необходимо, чтобы действительные части корней характеристического уравнения, соответствующего дифференциальному уравнению для тока или напряжения в рассматриваемой системе, имели отрицательные действительные части [1].

Обычная схема питания плазмтрона показана на рис. 1. Здесь R — балластное сопротивление, E — источник питания, C и L — емкость и индуктивность цепи. Условия устойчивости, полученные для такой цепи на основе статической вольт-амперной характеристики дуги [1], имеют вид

$$R + \mu > 0, \quad (1)$$

$$L + RC\mu > 0 \quad (2)$$

где $\mu = \left(\frac{\partial U}{\partial I} \right)_0$ — величина дифференциального сопротивления дуги в рабочей точке.

Корсунов Константин Анатольевич, профессор, зав. кафедрой.

Калюжный Геннадий Сергеевич, доцент.

Лыштва Елена Юрьевна, доцент.

Луганский университет имени Владимира Даля.
Украина, 91043, г. Луганск, кв. Молодежный, 20-а.
Тел. (0642) 50-08-29. E-mail: korsunof@mail.ru

Статья поступила в редакцию 8 апреля 2015 г.

© Корсунов К. А., Калюжный Г. С., Лыштва Е. Ю., 2015

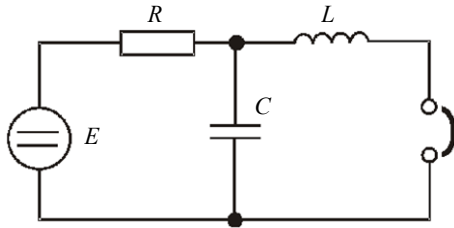


Рис. 1. Схема питания плазмоторна

При наличии достаточно быстро изменяющихся возмущений тока и напряжения становится необходимым принимать во внимание динамические свойства дуги. Это можно сделать с помощью динамической вольт-амперной характеристики дуги [1], записав следующее уравнение:

$$T \frac{du}{dt} + u = T R_0 \frac{di}{dt} + \mu i$$

где u и i — малые возмущение напряжения и силы тока дуги; $R_0 = U_0 / I_0$ — сопротивление дуги в рабочей точке.

Величина T , имеющая размерность времени, характеризует спад проводимости в момент отключения тока дуги. В общем случае она является функцией тока и напряжения. В работе [6] проведен расчет величины T для различных газов в широком диапазоне значений тока дуги. В частности, для воздуха в интервале токов от 50 до 200 А она может быть принята постоянной и равной 15 мкс.

Анализ схемы (1) с использованием динамической характеристики приводит к следующим условиям устойчивости [1]:

$$R + \mu > 0, \tag{3}$$

$$L + RC\mu + T(R + R_0) > 0, \tag{4}$$

$$RCL(L + RC\mu) + T\{L^2 + RR_0LC + RR_0C(L + RC\mu)\} + T^2(R + R_0)(L + RR_0C) > 0. \tag{5}$$

Первое из динамических условий (3)—(5) совпадает со статическим условием (1), два других являются уже новыми.

Для практического использования приведенных условий необходимо знать, как они соотносятся между собой, т. е. какие из них накладывают наиболее сильные ограничения на параметры схемы питания. В работе [1] показано, что динамические условия (4) и (5) заведомо выполняются, если выполнено статическое условие (2), т. е. учет динамических свойств расширяет область устойчивости. Поэтому конкретной задачей работы является сравнительный анализ динамических условий (4) и (5).

Полученные результаты

Для удобства анализа динамических условий введем безразмерные переменные:

$$\tau_1 = \frac{L}{|\mu|T}; \quad \tau_2 = \frac{RC}{T};$$

$$\tilde{R} = \frac{R}{|\mu|}; \quad \tilde{R}_0 = \frac{R_0}{|\mu|}.$$

Тогда условия устойчивости переписутся в более простом виде. Так, для статических условий получим соотношения:

$$\tilde{R} > 1, \tag{6}$$

$$\tau_2 < \tau_1, \tag{7}$$

а динамические условия принимаю вид:

$$\tilde{R} > 1, \tag{8}$$

$$\tau_2 < \tau_1 + \tilde{R} + \tilde{R}_0, \tag{9}$$

$$\tau_1\tau_2(\tau_1 - \tau_2) + \tau_1^2 + \tau_1\tau_2\tilde{R}_0 + \tau_2\tilde{R}_0(\tau_1 - \tau_2) + (\tilde{R} + \tilde{R}_0)(\tau_1 + \tau_2\tilde{R}_0) > 0. \tag{10}$$

Из такой формы записи легко видеть, что при выполнении статических условий динамические условия также заведомо выполняются.

Взаимное расположение областей устойчивости удобно анализировать на плоскости τ_1 — τ_2 . На ней область, определяемая статическими условиями, лежит ниже прямой

$$\tau_2 = \tau_1 \tag{11}$$

при $\tilde{R} > 1$. Динамическое условие (9) определяет область, лежащую ниже прямой

$$\tau_2 = \tau_1 + \tilde{R} + \tilde{R}_0. \tag{12}$$

Эта прямая проходит выше прямой (11), и новая область включает в себя предыдущую.

Для получения уравнения граничной кривой для неравенства (10) заменим его на соответствующее равенство, из которого потом выразим τ_2 в явном виде как функцию τ_1 :

$$\tau_2 = \frac{\tilde{R}\tilde{R}_0 + \tilde{R}_0^2 + 2\tilde{R}_0\tau_1 + \tau_1^2 + \sqrt{D}}{2(\tilde{R}_0 + \tau_1)}; \tag{13}$$

$$D = 4\tau_1(\tilde{R}_0 + \tau_1)(\tilde{R} + \tilde{R}_0 + \tau_1) + (\tilde{R}\tilde{R}_0 + (\tilde{R}_0 + \tau_1)^2)^2,$$

(второй корень уравнения получается отрицательным и должен быть отброшен).

Область устойчивости, определяемая условием (10) на плоскости τ_1 - τ_2 , лежит ниже линии, определяемой этим уравнением.

При $\tilde{R}=1$ уравнение (13) переходит в (12), и оба динамических условия совпадают. При $\tilde{R} > 1$, добавив под корнем положительную величину

$$4\tau_1(\tilde{R}-1)(\tilde{R}_0+\tau_1)(\tilde{R}+\tilde{R}_0+\tau_1)$$

и, увеличив тем самым правую часть уравнения (13), получим неравенство

$$\tau_2 < \tau_1 + \tilde{R} + \tilde{R}_0.$$

Это означает, что граничная линия условия (10) лежит ниже граничной линии условия (9), т. е. третье динамическое условие является более сильным и автоматически включает в себя второе условие.

Легко также показать, что кривая третьего условия (13) при росте τ_1 стремится к прямой линии:

$$\tau_2 = \tau_1 + 1 + \tilde{R}_0$$

т. е. к линии второго условия при $\tilde{R}=1$. Эта линия параллельна линии статического условия (11) и лежит на величину $\tilde{R}_0 + 1$ выше.

На рис. 2 показаны граничные линии статического и динамических условий устойчивости для различных значений \tilde{R} . Области устойчивости лежат ниже соответствующих граничных линий. При построении графиков значение \tilde{R}_0 было взято равным 2,38. Это следует из следующих соображений, приведенных далее.

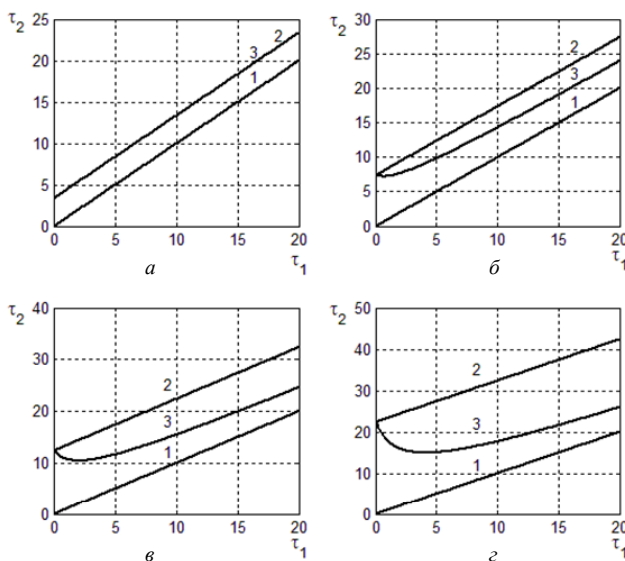


Рис. 2. Граничные линии статического (1) и динамических (2, 3) условий устойчивости при различных значениях \tilde{R} : а — $\tilde{R}=1$; б — $\tilde{R}=5$; в — $\tilde{R}=10$; г — $\tilde{R}=20$

Итак, для плазмотрона линейной схемы с самоустанавливающейся средней длиной дуги уравнение статической вольт-амперной характеристики дуги с воздушной стабилизацией при прямой полярности может быть записано в виде:

$$U = F(G, d, p)I^{-0,42}$$

в широком диапазоне параметров [4]. Здесь F — некоторая функция расхода газа G , диаметра разрядного канала d и давления p . Отсюда получаем дифференциальное сопротивление дуги

$$\mu = -0,42F(G, d, p)I^{-1,42}.$$

Сопротивление дуги в рабочей точке равно следующей величине:

$$R_0 = \frac{U_0}{I_0} = F(G, d, p)I^{-1,42}$$

и его безразмерное значение $\tilde{R}_0 = \frac{R}{|\mu|} = 2,38$.

Простое и быстрое определение областей устойчивости можно также провести с помощью графика, приведенного на рис. 3. На нем показаны граничные кривые динамического условия (10) при различных величинах безразмерного сопротивления \tilde{R} . Величина \tilde{R} указана возле каждой кривой. Прямая линия на графике соответствует статическому условию устойчивости (7).

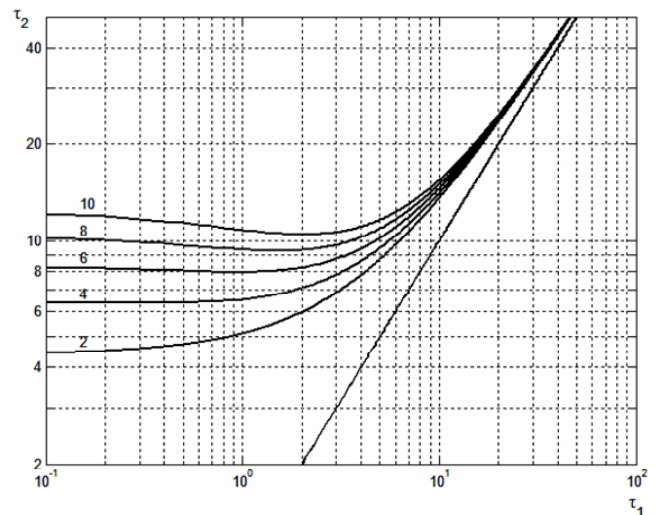


Рис. 3. Граничные кривые динамического условия устойчивости

Из рис. 3 видно, что отличие между статическим и динамическим условиями устойчивости становится существенным при $\tau_1 < 20$, или, как следует из определения τ_1 , при $L < 20|\mu|T$, т. е. при достаточно малой эквивалентной индуктивности схемы. При этом учет динамических условия по-

звolyет расширить диапазон допустимых величин емкости схемы.

Заклyчение

В работе проанализировано соотношение динамических условий устойчивости дуги. Показано, что три динамических условия устойчивости могут быть сведены к двум независимым. Сформулирован критерий, позволяющий определить область значений параметров схемы питания плазмотрона, в которой учет динамических свойств дуги становится необходимым. При этом предложен простой способ графической оценки области устойчивости системы «источник питания—дуга».

ЛИТЕРАТУРА

1. Жуков М. Ф., Коротеев А. С., Урюков Б. А. Прикладная динамика термической плазмы. — Новосибирск: Наука, 1975.
2. Дресвин С. В. Основы математического моделирования плазмотронов. — СПб, Изд-во Политех. ун-та, 2004.
3. Корсунов К. А. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 6. С. 724.
4. Даутов Г. Ю., Дзюба В. Л., Карп И. Н. Плазмотроны со стабилизированными электрическими дугами. — Киев: Наук. Думка, 1984.
5. Урюков Б. А., Хайтман С. М. // Изв. СО АН СССР, серия технических наук. 1973. Т. 3. Вып. 1. С. 13.
6. Колонина Л. И., Урюков Б. А. Расчет постоянной времени электрической дуги в разных газах. — В кн.: Устойчивость горения электрической дуги. Под ред. М. Ф. Жукова. — Новосибирск, Наука, 1973. С. 38—44.

Analysis of dynamic conditions for arcing stability in a plasmatron channel

K. A. Korsunov, G. S. Kaliuzhnyi, and Ye. Yu. Lyshtvan

Vladimir Dal' Lugansk University
20-a Molodezhnyi kv., Lugansk, 91043, Ukraine
E-mail: korsunof@mail.ru

Received April 8, 2015

The dynamic conditions for electric arc stability in a plasmatron channel are analyzed. It is shown that two of the three known dynamic stability conditions are independent. A criterion is proposed that allows one to determine the range of parameters of a plasmatron supply circuit, where dynamic arc conditions must be taken into account.

PACS: 52.75.Hn

Keywords: electric arc, plasmatron, power supply, stability, characteristics, criterion.

REFERENCES

1. M. F. Zhukov, A. S. Koroteev, and B. A. Uryukov, *Applied Dynamics of Thermal Plasma* (Nauka, Novosibirsk, 1975) [in Russian].
2. S. V. Dresvin, *Foundations of Mathematical Modeling for Plasmotrons* (Politekh. Inst., SPb., 2004) [in Russian].
3. K. A. Korsunov, *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **1**, 724 (2013).
4. G. Yu. Dautov, V. L. Dzyuba, and I. N. Karp, *Plasmotrons with Stabilized Electric Arcs* (Naukova Dumka, Kiev, 1984) [in Russian].
5. B. A. Uryukov and S. M. Khaitman, *Izv. SO AN SSSR. Ser. Tekhn. Nauk.* **3** (1), 13 (1973).
6. L. I. Kolonina and B. A. Uryukov, in *Book: Stability of Arcing*. Ed. by M.F. Zhukov (Nauka, Novosibirsk, 1973). P. 38—44 [in Russian].

* * *