

Разработка цифровой модели источника питания для генератора низкотемпературной плазмы постоянного тока

А.В. Боешко, Ю.В. Мурашов, Н.В. Образцов, Р.И. Жилиготов, Н.К. Куракина*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

**obraztsovnikita@yandex.ru*

Аннотация. Проведен анализ работы источника питания для плазмотрона постоянного тока. Анализ выполнен на основе моделирования силового узла источника питания, с учетом вольтамперной характеристики тиристорных. Разработанная модель позволяет проводить анализ характеристик напряжения и тока источника питания на нагрузке, в различных режимах работы. В результате анализа нагрузочной характеристики тиристорного источника питания при различных значениях угла управления определен характер внешних характеристик.

Ключевые слова: плазмотрон постоянного тока, тиристорный выпрямитель, вольтамперная характеристика, характеристика источника питания.

1. Введение

Устройства, генерирующие низкотемпературную плазму, были созданы ещё в прошлом веке и сейчас активно используются в промышленности [1]. При проектировании и разработке оборудования для плазменных технологий необходимо учитывать физические процессы, протекающие в плазменной дуге и влияние процессов на систему питания [2, 3].

Характеристики тока и напряжения источника питания непосредственно оказывают влияние на стабильность горения дуги [4]. Источник питания для генератора низкотемпературной плазмы постоянного тока, может быть основан на различных топологиях [5]. Самыми распространенными являются тиристорные источники с крутопадающей вольтамперной характеристикой. Основным конструктивным элементом силового блока является трёхфазный мостовой выпрямитель, построенный на тиристорах.

Плазмотрон представляет собой нелинейную нагрузку, обладая при этом очень малой инерционностью (десятки микросекунд). Для обеспечения стабильных характеристик, тиристорный источник, комплектуется линейным дросселем. Кроме того, введение дросселя в выходную цепь позволяет уменьшить колебания тока, а с добавлением обратной связи по току, позволяет получить характеристики источника тока.

В данной работе разработана модель силовой части тиристорного выпрямителя для установки плазменного напыления и резки металлов, на базе АПР-404, с целью исследования характеристик источника питания. Методика исследования основана на построении нестационарной численной модели в программной пакете Comsol Multiphysics.

2. Постановка задачи

Моделирование электрических цепей связано с решением фундаментальных уравнений, представляющих собой законы Кирхгофа, которые, в свою очередь, могут быть выведены из уравнений Максвелла. В результате можно определить мгновенные значения токов и напряжений в цепи при различных входных воздействиях. Возможности моделирования электрических цепей полезны при моделировании всех видов электрических и электромеханических устройств, начиная от нагревателей и двигателей и заканчивая передовыми плазменными генераторами [6].

Для создания модели применяется интерфейс «Electrical Circuit» в среде COMSOL Multiphysics [7]. Данный интерфейс позволяет моделировать сложные нелинейные электрические цепи, и включает в себя источники напряжения и тока, резисторы, конденсаторы, индуктивные элементы, полупроводниковые элементы.

Принципиальная схема трёхфазного мостового тиристорного выпрямителя АПР-404 показана на рисунке 1, где индуктивность Ld это сумма индуктивностей шин и дросселей, входящих в состав выпрямителя. Rn представляет собой нагрузочный резистор, сопротивление которого соответствует сопротивлению дуги плазматрона.

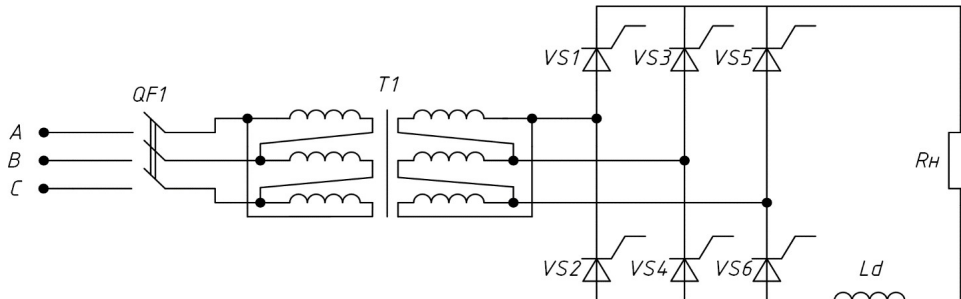


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема тиристорного источника питания.

В исследуемом источнике питания применяются двухпозиционные тиристорные модули МТЗ-540-16-А2 [7]. При моделировании необходимо учитывать вольтамперную характеристику тиристоров (ВАХ). Кроме того, температурный режим тиристоров оказывает непосредственное влияние на ВАХ. С повышением температуры помимо увеличения обратного тока центрального р-п перехода тиристора происходит увеличение коэффициентов усиления по току. Это приводит к увеличению анодного тока через полупроводниковый прибор. Для тиристора это означает, что с повышением температуры включение его осуществляется при меньшем анодном напряжении [9]. Поэтому необходимо ввести зависимость ВАХ тиристора от температуры. Для определения данной зависимости используется программный комплекс MATLAB, где промежуточные значения ВАХ определялись интерполяцией двумерной функции, на основании данных тиристора при 25 °С и 130 °С. При этом, интерполяция проводилась методом «takima», представляющего собой модифицированную интерполяцию кубического Эрмита Акимы [10].

Для проверки корректности вольтамперной характеристики смоделированных тиристоров. Проведено сравнение паспортных данных тиристорных модулей и ВАХ тиристоров из модели, для граничных температур 25 °С и 130 °С (рис. 2). Как видно из построенных графиков, в области до 800 А ВАХ соответствуют значениям производителя. Данная зависимость в дальнейшем может использоваться при расчете тепловой модели источника питания. В частности, определение тепловых потерь в ключах для проектирования системы охлаждения.

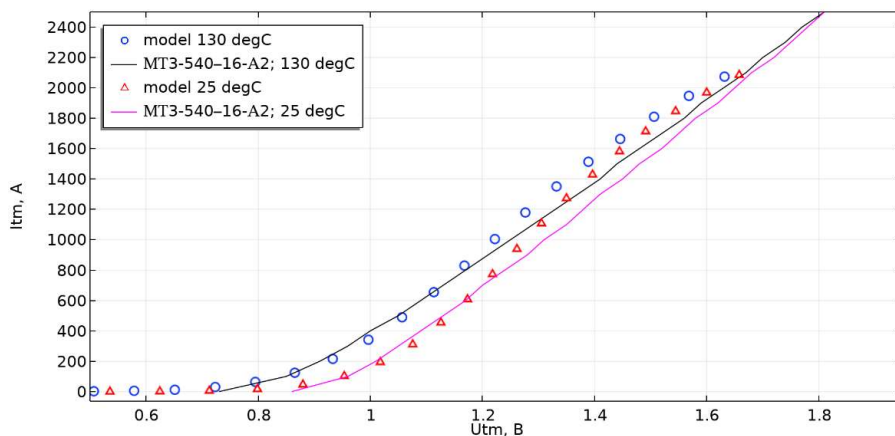


Рис. 2. Вольтамперные характеристики смоделированных тиристоров и производителя.

Расчет модели в программе Comsol multiphysics выполнен нелинейным решателем для интервала времени от 0 до 0.15 секунд, с целью определения характеристик тока и напряжения на выходе источника питания.

3. Результаты и их обсуждение

В результате численного моделирования источника питания, получена осциллограмма напряжения и тока на нагрузке $R_n = 1 \text{ Ом}$, показывающая работу источника питания (рис. 3, рис. 4). При этом, действующее значение напряжение на нагрузке равно 206.8 В, а действующий ток равен 189.3 А. Коэффициент пульсации составляет 0.057.

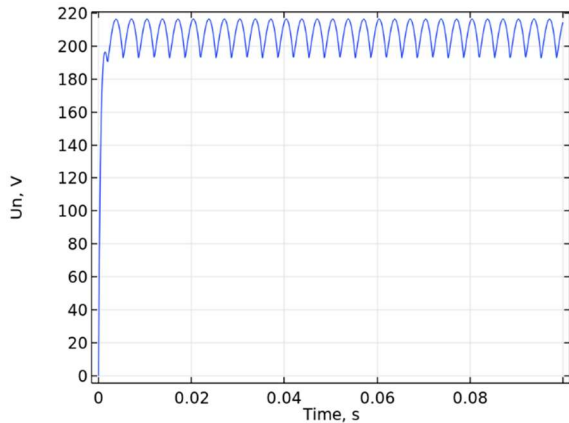


Рис. 3. Осциллограмма напряжения на нагрузке.

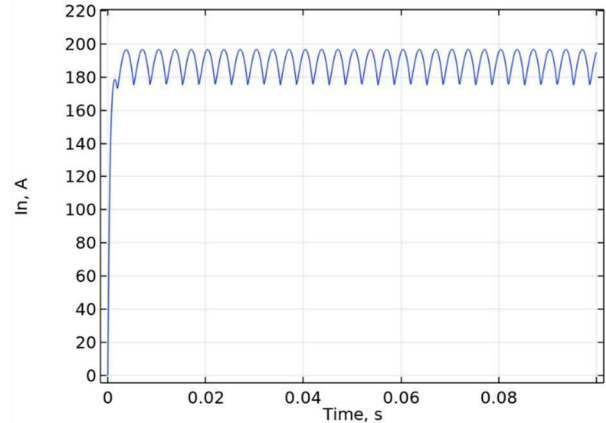


Рис. 4. Осциллограмма тока на нагрузке.

Нагрузочные характеристики (Рис. 5), демонстрируют зависимость выпрямленного напряжения от тока на выходе источника, для различных углов управления. На углах управления от 0° до 60° источник питания демонстрирует стабильность характеристик напряжения, независимо от тока. Однако на высоких углах управления от 75° , характеристика становится падающей.

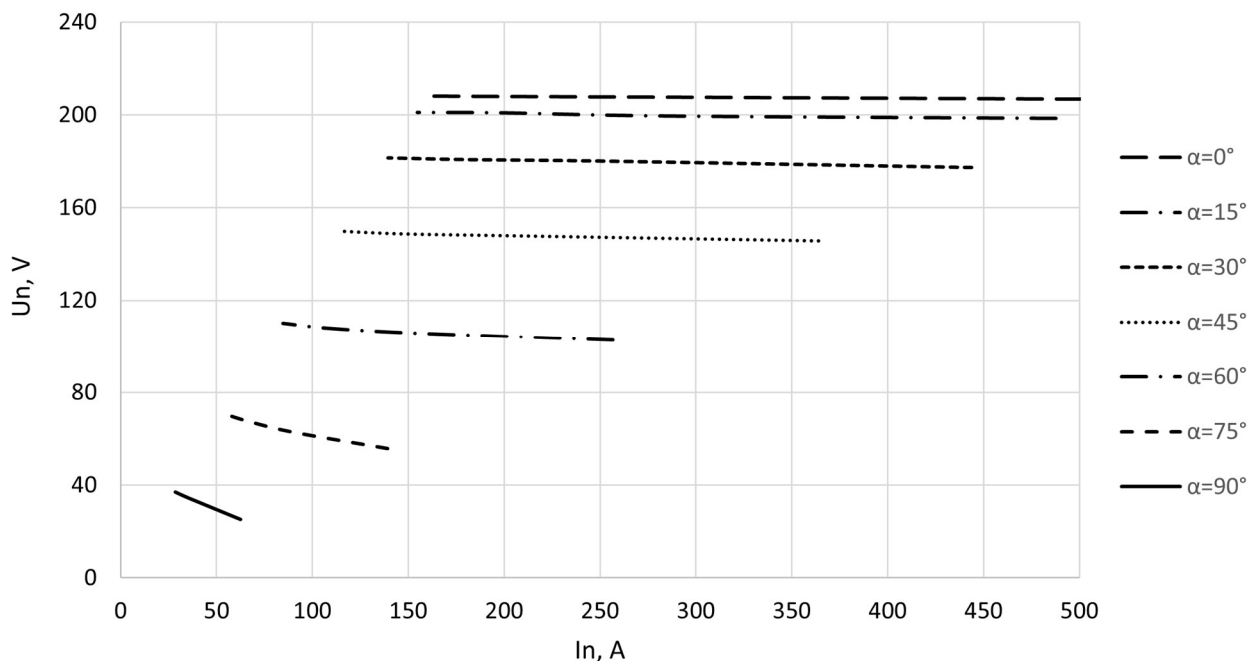


Рис. 5. Нагрузочные характеристики источника питания при различных углах управления.

При работе дуговой электроплазменной установки необходимо обеспечить устойчивость горения электрической дуги, что достижимо особым режимом работы источника питания и плазмотрона. Для обеспечения устойчивости горения дуги плазмотрона требуется, чтобы источник питания имел крутопадающую вольтамперную характеристику [11]. Источники питания, использующие такую характеристику, наиболее распространены в настоящее время. Жесткие или горизонтальные характеристики, для которых выходное напряжение остается постоянным при изменении тока, могут использоваться для плазмотронов с возрастающей вольтамперной характеристикой, либо с балластным сопротивлением. Однако это приводит к уменьшению КПД всей установки. В рамках анализа модели из рисунка 5 установлено, что крутопадающая характеристика имеется только на больших углах управления. Поэтому эксплуатация источника питания с плазмотроном возможна на углах управления более 75° . Для эксплуатации источника питания на всем диапазоне регулирования необходимо введение замкнутой системы управления, которая может обеспечить крутопадающую характеристику.

Регулировочные характеристики источника питания, представленные на рисунке 6, представляют собой зависимость выпрямленного напряжения на выходе источника от угла управления α , для трех различных сопротивлений нагрузки R_n . Моделирование проводилось для трех режимов работы плазмотрона, в которых сопротивление дуги равнялось: 0,8, 1, 1,2 Ом. Данные характеристики позволяют понять диапазон регулирования источника. В дальнейшем благодаря регулировочной характеристике можно реализовать замкнутую систему управления источником питания.

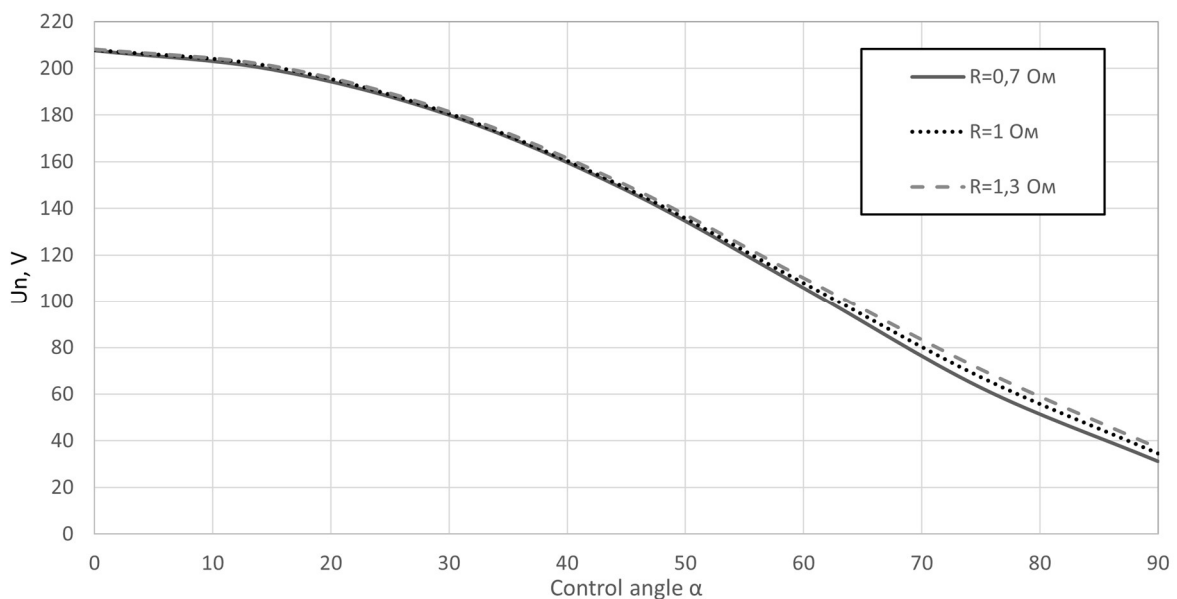


Рис. 6. Регулировочные характеристики источника питания при различных значениях сопротивления нагрузки.

4. Заключение

Разработана нестационарная численная модель источника питания для генератора низкотемпературной плазмы постоянного тока. Модель позволяет рассмотреть выходные характеристики источника питания непосредственно оказывающие влияние на стабильность горения дуги. При реализации компьютерной модели учтена ВАХ тиристоров, а также влияние температуры на данную характеристику в диапазоне от 25°C до 130°C . Сняты нагрузочные и регулировочные характеристики, показывающие возможности изменения уровня напряжения в нагрузке. В соответствии с результатами определены возможности

работы источника питания с плазмотроном, а также обосновано введение замкнутой системы управления. Следующим этапом развития представленной модели предполагается добавление нагрузки в виде нелинейного элемента, и в последствии непосредственное объединение модели источника с плазмотроном.

5. Список литературы

- [1] Н.В. Образцов, Ю.В. Мурашов, Р.И. Жилиготовов, Н.К. Куракина, Гибридная модель плазмотрона постоянного тока с учетом влияния параметров источника питания, *Газоразрядная плазма и синтез наноструктур: материалы III Международной конференции*. Казань: Бук, 348–351, 2022.
- [2] M. Kambara, et al., Science-based, data-driven developments in plasma processing for material synthesis and device-integration technologies, *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. **62**, SA0803, 2022, doi: 10.35848/1347-4065/ac9189
- [3] I. Murashov, et al., Numerical simulation of DC air plasma torch modes and plasma jet instability for thermal spraying technology, *MATEC Web Conf.*, vol. **245**, 04003, 2018, doi: 10.1051/mateconf/201824504003
- [4] Ю.В. Мурашов, *Разработка дугового плазмотрона для нанесения покрытий с учетом явлений неустойчивости плазменного потока 05.09.10*. Диссертация кандидата технических наук, Санкт-Петербург, 2016.
- [5] J. Solanki, et al., High-current variable-voltage rectifiers: State of the art topologies, *IET Power Electronics*, vol. 8(6), 1068–1080, 2015, doi: 10.1049/iet-pel.2014.0533
- [6] S. Shamsir, et al., Semiconductor Device Modeling and Simulation for Electronic Circuit Design, *Modeling and Simulation in Engineering – Selected Problems*, ed. Valdman J., Marcinkowski L. *IntechOpen*, 2020, doi:10.5772/intechopen.92037
- [7] COMSOL Multiphysics, The Electrical Circuit Interface [online]; https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.acdc/acdc_ug_electrical_circuit.09.02.html
- [8] Модуль тиристорный MT3-540-16-A2 [online]; <https://proton-electrotex.com/MT3-540-16-A2>
- [9] B. Feng, et al., Thermal Behaviors of Thyristors in Repetitive Pulsed Power Applications, *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. **50**(10), 3659–3667, 2022, doi: 10.1109/TPS.2022.3206242
- [10] MATLAB, Modified Akima piecewise cubic Hermite interpolation [online]; <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/makima.html>
- [11] Фролов В.Я., и др., *Электротехнологические промышленные установки*. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010.