

РЕГУЛИРОВАНИЕ ТОКА СЖАТОЙ ДУГИ В КАНАЛЕ ПЛАЗМОТРОНА

А.Ю. Воронов, В.А. Герасимов

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток
E-mail: voronov86@gmail.com

Повышение стабильности горения сжатой дуги в канале плазмотрона достигается улучшением качества процесса регулирования тока в контуре системы автоматического регулирования тока дуги. Приведена методика параметрической оптимизации регулятора тока, показаны результаты проверки теоретических расчетов на реальном объекте.

Ключевые слова:

Плазма, сжатая электрическая дуга, система автоматического регулирования, регулятор тока, математическое моделирование, среднеквадратическая ошибка, спектральная плотность.

Key words:

Plasma, compressed electric arc, automatic control system, current controller, mathematic modeling, mean-root-square error, spectral density.

Введение

В последнее время особо перспективным направлением является применение плазменного розжига для воспламенения различных видов жидких углеводородных топлив. Объясняется этот факт тем, что плазма обладает рядом важных для процесса воспламенения свойств. Частицы топлива, попадая в плазменную струю, испытывают тепловой удар. Происходит их дробление, в результате чего резко возрастает поверхность взаимодействия топлива с окислителем. Наряду с наличием в плазме таких активных центров, как ионы, радикалы и атомы, это приводит к интенсификации химических реакций горения [1].

Результатом описанного процесса является расширение границ устойчивого розжига горючих смесей различных концентраций и физико-химических свойств. Для широкого внедрения плазменного розжига необходима разработка специализированных источников питания сжатой дуги. Особенно эта проблема актуальна в области малых токов, где процесс горения дуги наименее стабилен.

Ключевыми факторами при выборе источника питания сжатой дуги на малых токах является его способность к минимизации пульсаций тока, что является основным критерием стабильности горения дуги, а также массогабаритные показатели источника питания. С учетом указанных факторов замкнутая система автоматического регулирования (САР) с обратной связью по току является наилучшим вариантом реализации источника питания [2, 3].

Основной задачей данной работы является нахождение оптимальной структуры и параметров регулятора тока САР, которые способны обеспечить должные динамические свойства системы с целью получения необходимого запаса устойчивости и быстродействия. Это возможно путем сочетания аналитических методов расчета и математического моделирования.

Математическая модель системы автоматического регулирования

Математическое моделирование позволяет вести исследование различных режимов работы САР,

проводить оптимизацию ее основных узлов с учетом особенностей реальной системы. К таким особенностям относятся наличие газодинамических возмущений, действующих на объект регулирования, дискретность широтно-импульсного модулятора (ШИМ), наличие в цепи нагрузки обратного диода, зависимость напряжения на дуге от тока, а также ряд нелинейностей типа ограничение.

Функциональная схема САР изображена на рис. 1. Входным сигналом САР является уставка I_3 заданного тока дуги. Из неё вычитается фактический ток дуги, значение которого формируется в блоке измерительного преобразователя тока ОС. Полученный сигнал рассогласования поступает на вход регулятора тока РТ. Регулятор тока в соответствии с установленным алгоритмом формирует сигнал управляющего воздействия U_y . Последний сравнивается с несущим сигналом пилообразной формы $U_{ГПН}$, поступающим с генератора пилообразного напряжения ГПН. В результате чего образуются импульсы, управляющие коммутацией ШИМ. Напряжение питания ШИМ равно U_n .

Цепь нагрузки источника питания состоит из сглаживающего реактора L , обратного диода VD и дугового промежутка. В интервале паузы ШИМ ток дуги замыкается через обратный диод, а сглаживающий реактор обеспечивает протекание непрерывного тока через дуговой промежуток. Сжатая дуга представлена в виде последовательно включенных противоЭДС $U_{ст}$ (статическая составляющая), которая линейно зависит от тока дуги, и источника напряжения $U_{дин}$ (динамическая составляющая), который может быть включен как согласованно, так и встречно с $U_{ст}$ [4]. ШИМ вместе с цепью нагрузки образуют силовую часть САР, которая выполнена в виде понижающего импульсного регулятора напряжения [5].

Обеспечение требуемых показателей качества процесса регулирования (быстродействие, перерегулирование, установившаяся ошибка), как известно из теории автоматического управления, достигается выбором соответствующей структуры регулятора и численных значений его параметров [6].

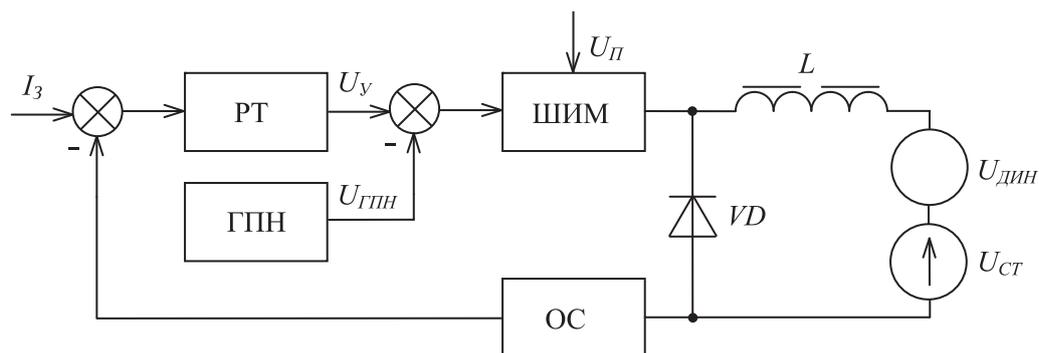


Рис. 1. Функциональная схема системы автоматического регулирования

Как следует из рис. 1, САР представляет собой одноконтурную замкнутую систему автоматического регулирования, неизвестным звеном которой является именно регулятор тока. Остальные элементы формируют функционально-необходимую часть САР. Структура и параметры этой части принимаются на основании характеристик объекта регулирования системы и обеспечения рационального сочетания технико-экономических и массогабаритных показателей.

Синтез регулятора тока САР был выполнен методом желаемых логарифмических частотных характеристик (ЛАЧХ) [7]. Структура регулятора соответствует пропорционально-интегральному (ПИ)звену с передаточной функцией:

$$W_{PT}(s) = k_{PT} + \frac{1}{T_{PT}s}$$

где k_{PT} и T_{PT} – параметры регулятора: $k_{PT}=3,1$, $T_{PT}=4,5 \cdot 10^{-4}$ с. Полученные результаты позволяют перейти к построению математической модели САР. Однако их следует считать лишь первым приближением, требующим дальнейшего уточнения, так как расчет выполнялся без учета динамических характеристик объекта регулирования и при определенных допущениях относительно силовой части САР.

На основании разработанной функциональной схемы была составлена математическая модель САР. Моделирование выполнялось в электронном пакете MatLab. Динамическая составляющая модели дуги представлена в виде сигнала белого шума, имеюще-

го единичную спектральную плотность, пропущенного через формирующий фильтр [6]. Параметры и структура формирующего фильтра и зависимость статической составляющей от тока были найдены в результате обработки экспериментальных данных. Осциллограмма тока, снятая в математической модели при предварительных настройках регулятора, изображена на рис. 2. Анализ приведенной осциллограммы позволяет утверждать, что найденные методом желаемых ЛАЧХ настройки регулятора не обеспечивают должного качества процесса регулирования. Ток в дуговом промежутке колеблется в достаточно широких пределах. Для улучшения качества процесса регулирования необходимо при неизменной структуре регулятора (ПИ-регулятор) произвести его параметрическую оптимизацию.

Параметрическая оптимизация регулятора тока

Выбор критерия оптимизации необходимо производить с учетом специфики объекта регулирования САР. При анализе работы систем, находящихся под влиянием стационарных случайных воздействий, каковыми являются газодинамические возмущения, не могут быть применены обычные методы определения точности в установленном режиме. Если взять за показатель качества среднее значение ошибки, то при усреднении положительные и отрицательные ошибки компенсируют друг друга. Поэтому наиболее приемлемым показателем качества таких систем является средняя квадратическая ошибка системы [8]. Она равна квадратному

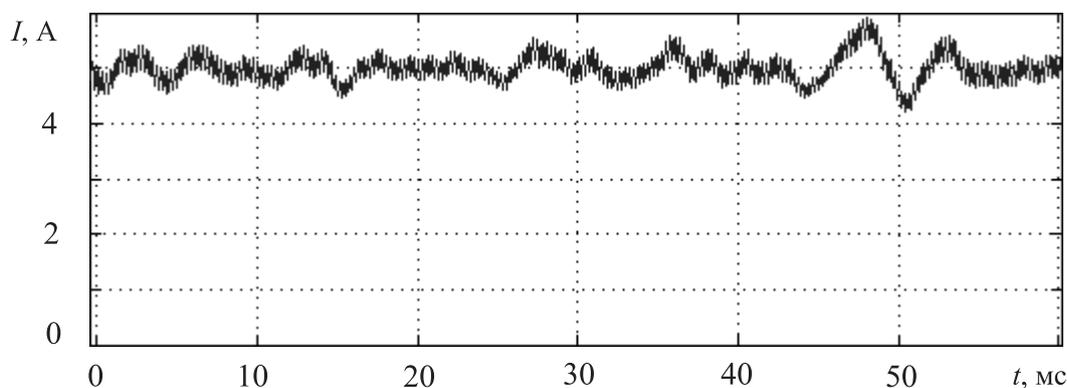


Рис. 2. Осциллограмма тока в математической модели при предварительных настройках регулятора

корню из дисперсии ошибки (среднего значения квадрата отклонения выходной величины). Дисперсию возможно найти различными способами, однако прогнозируя дальнейший анализ результатов, наиболее целесообразно это сделать через корреляционную функцию ошибки $R_\varepsilon(\tau)$:

$$\varepsilon_{\text{кв}} = \sqrt{R_\varepsilon(0)},$$

где $\varepsilon_{\text{кв}}$ – среднеквадратическая ошибка системы, $R_\varepsilon(0)$ – начальное значение корреляционной функции. Также через корреляционную функцию ошибки возможно найти ее спектральную плотность $S_\varepsilon(\omega)$ [6, 8]:

$$S_\varepsilon(\omega) = 2 \int_0^\infty R_\varepsilon(\tau) d\tau.$$

График спектральной плотности ошибки позволяет установить причину возникновения ошибки. Спектральная плотность ошибки системы при предварительных настройках регулятора приведена на рис. 3, а. На рисунке видны характерные пики спектральной плотности, кратные частоте 21980 рад/с (3,5 кГц). Эти пики вызваны коммутацией широтно-импульсного модулятора (ШИМ), которая также отчетливо просматривается на осциллограммах тока. Однако помимо указанной ошибки, в области низких частот присутствует ошибка, вызванная неточной настройкой регулятора.

Параметрическая оптимизация регулятора позволяет снизить эту составляющую ошибки. Оптимизация производилась методом покоординатного спуска (Гауса–Зейделя) по критерию минимума среднеквадратической ошибки. Уточненные параметры регулятора составили $k_p=14$, $T_p=2,5 \cdot 10^{-5}$ с. Спектральная плотность ошибки, соответствующая уточненным параметрам регулятора представлена на рис. 3, б. Из рисунка следует, что удалось практически полностью устранить ошибку на выходе САР в области низких частот. Осциллограмма тока дуги, измеренная при уточненных параметрах регулятора и приведенная на рис. 4, подтверждает улучшение качества процесса регулирования. Среднеквадратическая ошибка системы была снижена с 0,238 до 0,119 А.

Проверка результатов математического моделирования и теоретических расчетов производилась на реальной САР. Осциллограммы токов и напряжений на дуге, снятые в реальной системе при предварительных и уточненных настройках регулятора, изображены на рис. 5, а и б, соответственно. На осциллограммах ось напряжения направлена вверх и имеет цену деления 100 В/дел, ось тока направлена вниз и имеет цену деления 2 А/дел. Нулевое значение тока и напряжения соответствует маркеру, расположенному по центру. Горизонтально расположена ось времени с ценой деления 5 мс/дел.

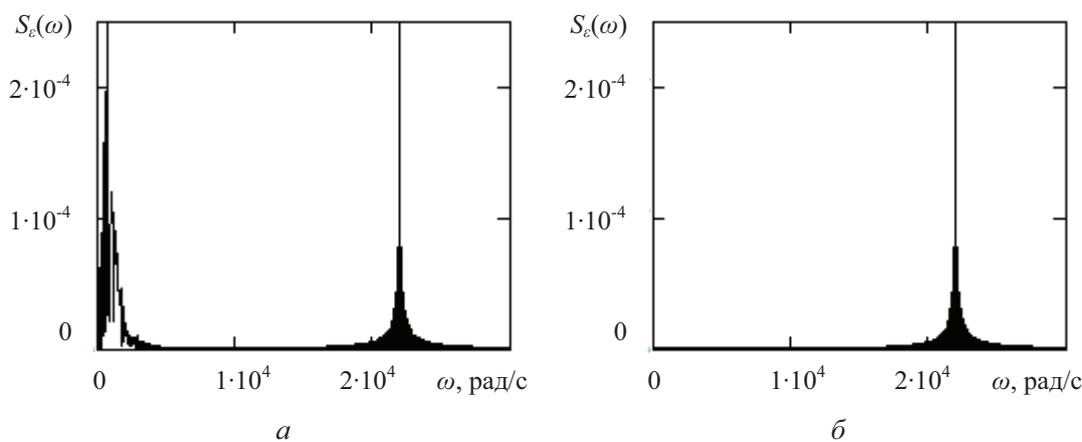


Рис. 3. Спектральная плотность ошибки САР при параметрах регулятора: а) предварительных; б) уточненных

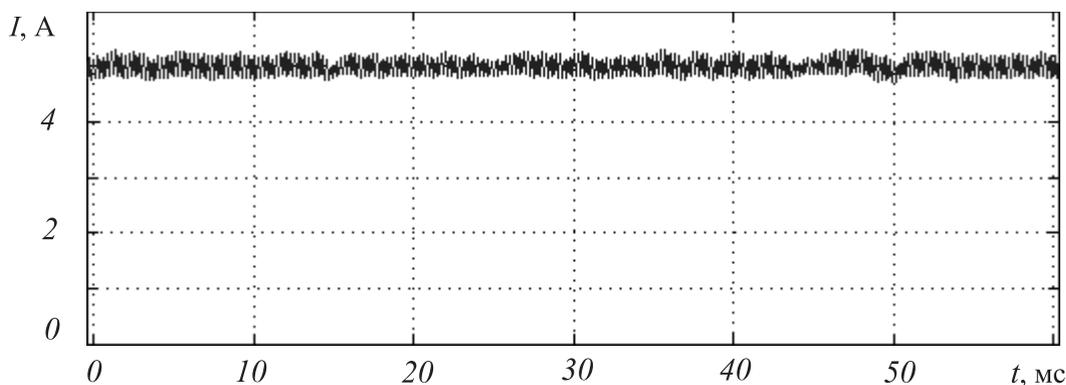


Рис. 4. Осциллограмма тока дуги в математической модели при уточненных параметрах регулятора

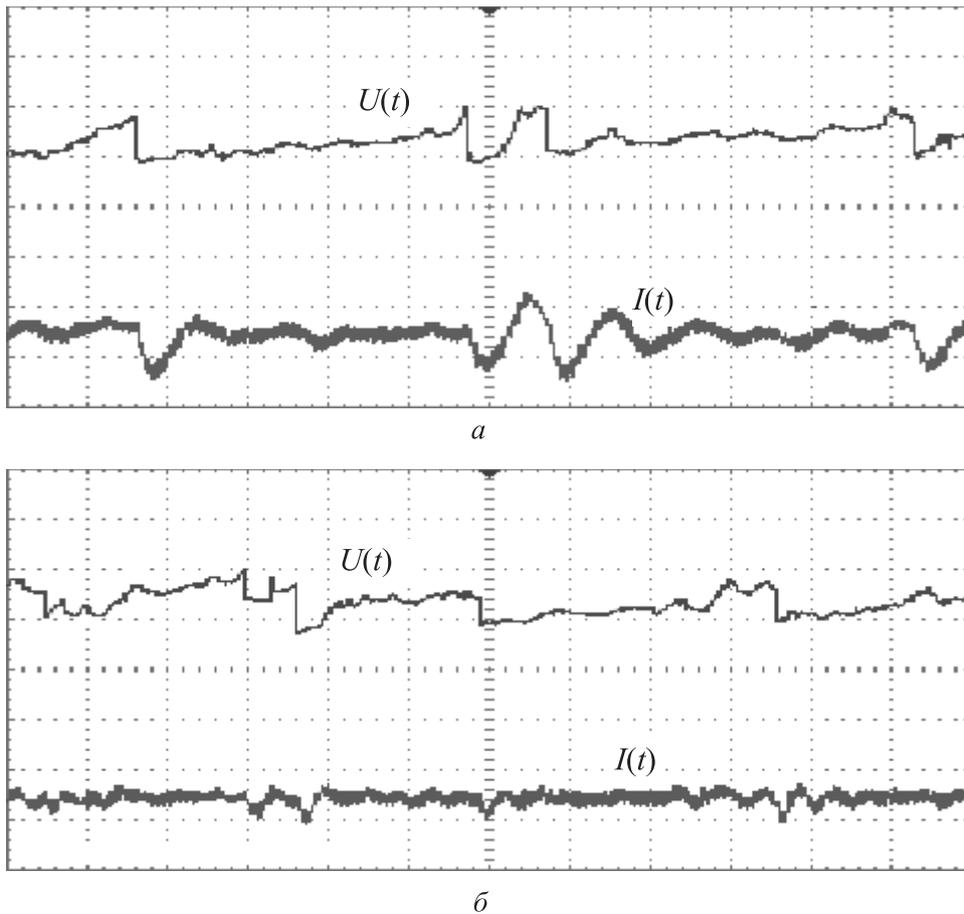


Рис. 5. Осциллограммы тока $I(t)$ и напряжения $U(t)$ в реальной САР при параметрах регулятора: а) предварительных; б) уточненных

Анализ приведенных осциллограмм показывает, что параметрическая оптимизация регулятора привела к значительному улучшению качества процесса регулирования тока в контуре САР. Среднеквадратическая ошибка уменьшилась с 0,501 до 0,349 А. Более высокое значение ошибки и отличия осциллограмм тока в реальной системе от математической модели обусловлены приближенным описанием объекта регулирования, а также схемотехническими особенностями построения реальной системы.

Заключение

Наилучшим вариантом реализации источника питания сжатой дуги является система автоматического регулирования тока дуги, представляющей одноконтурную замкнутую систему с обратной связью по току, неизвестным звеном которой является регулятор тока. Синтез регулятора тока осуществлен методом желаемых логарифмических частотных характеристик. Полученная структура ре-

гулятора соответствует пропорционально-интегральному звену.

Исследования работы системы автоматического регулирования на математической модели показали, что найденные первоначальные настройки регулятора не обеспечивают необходимого качества процесса регулирования. Это объясняется принятыми в ходе синтеза регулятора тока допущениями.

Требуемые показатели качества регулирования достигаются выбором соответствующих параметров регулятора. Параметрическая оптимизация регулятора тока методом покоординатного спуска по критерию минимума среднеквадратической ошибки позволила улучшить качество регулирования тока в контуре системы автоматического регулирования. Проверка теоретических расчетов на реальной системе показала качественное совпадение результатов — параметрическая оптимизация регулятора привела к существенному снижению пульсаций тока дуги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романовский Г.Ф. Плазменное воспламенение и сжигание топлива в судовых установках. – Л.: Судостроение, 1986. – 88 с.
2. Жуков М.Ф., Коротеев В.А., Урюков Б.А. Прикладная динамика термической плазмы. – Новосибирск: Наука, 1975. – 299 с.
3. Воронов А.Ю., Герасимов В.А. Электрическая дуга в канале плазматрона при случайных газодинамических возмущениях // Вологодские чтения: Матер. научно-техн. конф. – Владивосток: ДВГТУ, 2009. – С. 95.
4. Достовалов В.А. Газодинамическое управление термической плазмой. – Владивосток: ДВГТУ, 2004. – 230 с.
5. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с.
6. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – СПб.: Профессия, 2003. – 747 с.
7. Солодовников В.В., Плотников В.Н., Яковлев А.В. Теория автоматического управления техническими системами. – М.: МГТУ, 1993. – 492 с.
8. Катханов М.Н. Теория судовых автоматических систем. – Л.: Судостроение, 1985. – 374 с.

Поступила 29.03.2011 г.

УДК 621.314:621.382:621.314.572

МЕТОДИКА РАСЧЕТА КПД МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

С.А. Харитонов, А.Г. Гарганеев*

Новосибирский государственный технический университет

*Томский политехнический университет

E-mail: Kharit@ntcom.ru; garganeev@rambler.ru

Предложена методика расчета активных потерь в элементах системы генерирования постоянного тока на базе магнитоэлектрического синхронного генератора и полупроводникового преобразователя. Особое внимание уделено анализу электрических потерь в синхронном генераторе: учитываются как искажения формы тока и напряжения синхронного генератора, так и изменение частоты вращения его вала, что позволяет повысить точность расчетов и качество проектирования отдельных элементов системы.

Ключевые слова:

КПД, мехатронная система, синхронный генератор с постоянными магнитами, полупроводниковый преобразователь, переменная частота, ветроэнергетическая установка.

Key words:

Efficiency, mechatron system, synchronous generator with permanent magnets, semiconductor converter, variable frequency, wind power installation.

Разработка методики расчета КПД и расчет активных потерь в элементах систем генерирования электрической энергии (СГЭЭ), в которых механическая энергия вращающегося с переменной скоростью вала синхронного генератора с постоянными магнитами (далее по тексту магнитоэлектрический генератор – МЭГ), преобразуется в электрическую энергию постоянного или переменного тока является задачей актуальной, так как такие системы находят широкое применение в возобновляемой энергетике, а также в системах электроснабжения автономных объектов, в частности летательных аппаратов. Проблеме анализа энергетических процессов в системах «синхронный генератор – полупроводниковый преобразователь» посвящен ряд работ научных школ МАИ, МЭИ, ТПУ, ВНИИЭ и др. Однако, анализ таких систем с магнитоэлектрическим генератором при переменной скорости вращения вала в составе систем генерирования электрической энергии впервые проведен в научной школе профессора Г.В. Грабовецкого из Новосибирского государственного технического университета (ныне НГТУ).

Ниже рассматривается мехатронная СГЭЭ постоянного тока, в состав которой входят (рисунок): m -фазный синхронный генератор (СГ) – МЭГ, полупроводниковый преобразователь (ПП) с естественной коммутацией (ЕК), реактор L_f , моделирующий индуктивность фидера между СГ и ПП, или специально установленный [1].

Предполагается, что данная система является частью ветроэнергетической установки с переменной частотой вращения вала ветровой турбины. В СГЭЭ электрическая энергия переменного на выходе МЭГ преобразуется в электрическую энергию постоянного тока с помощью ПП с ЕК, например, на основе управляемого выпрямителя. Выпрямитель работает на противоЭДС постоянного тока e_c [1]. Подобная система может применяться самостоятельно, либо, например, являться источником напряжения в звене постоянного тока преобразователя частоты с инвертором напряжения.

При расчете КПД основное внимание уделяется анализу активных потерь, прежде всего в СГ, при учете несинусоидального характера тока и напряжения в сечении S_{Cr} (рисунок). Отличительными осо-