

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Н. Н. Баранов, Разработка методов контроля и управления режимом разряда на электродах в плазменных энергоустановках,
ТВТ, 2001, том 39, выпуск 6, 986–996

<https://www.mathnet.ru/tvt2006>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<https://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.14.88

23 апреля 2025 г., 20:39:41



МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 621.362

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ РАЗРЯДА НА ЭЛЕКТРОДАХ В ПЛАЗМЕННЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВКАХ

© 2001 г. Н. Н. Баранов

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

Поступила в редакцию 04.06.2001 г.

Выполнен сравнительный анализ условий работы электродов в плазменных энергоустановках (ЭУ) разных типов – магнитогидродинамических генераторах и термоэмиссионных преобразователях. Приведены результаты экспериментальной проверки универсального электрофизического метода флуктуационной диагностики для контроля электроразрядных процессов, а также выявления и предотвращения нештатных (предавварийных) состояний в работе ЭУ. Показано, что методы флуктуационной диагностики могут эффективно применяться при разработке устройств технического контроля (в режиме реального времени) и управления плазменными ЭУ различных типов с целью повышения их надежности и ресурса.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема создания высокоэффективных плазменных энергоустановок, работающих на основе методов прямого преобразования энергии (ЭУ ППЭ): магнитогидродинамических генераторов (МГДГ), термоэмиссионных преобразователей (ТЭП) – связана не только с достижением высоких удельных энергетических характеристик, делающих их конкурентоспособными по сравнению с другими типами энергоисточников, но и с обеспечением высокой надежности и длительного ресурса работы ЭУ. Для этого необходимо, в первую очередь, осуществление контроля режима разряда на электродах в ЭУ ППЭ, поскольку режим разряда является одним из важнейших факторов, определяющих надежность работы плазменной энергоустановки [1].

Режим протекания тока на электрод (или вид разряда на электроде) в плазменных ЭУ в значительной степени зависит от величины отбираемого тока, от типа и параметров электрода (материала, конфигурации, температуры), параметров рабочей среды межэлектродного промежутка (температуры, давления, концентрации компонентов плазмы) и ряда других факторов.

В соответствии с принятой терминологией различают следующие виды разряда на электродах в плазменных ЭУ:

диффузный или диффузионный (разряд, распределенный равномерно по всей поверхности электрода, характерен, как правило, для небольших плотностей тока);

микродуговой (на поверхности электрода одновременно находится несколько микродуг с суммарным током в единицы–десятки ампер);

сильноточный дуговой (на поверхности электрода горит одна силовая дуга с током от нескольких десятков до ста ампер и выше).

Разряд на электроде может быть неподвижным или перемещающимся. Диффузный разряд является неподвижным, в то время как микродуги хаотически перемещаются по поверхности электрода. Сильноточные дуги обычно неподвижны и располагаются на кромках электродов.

Как правило, штатному (номинальному) режиму работы плазменной ЭУ соответствует определенный вид разряда на электродах, обеспечивающий ее длительную, безаварийную эксплуатацию.

Выполненные исследования (с различными типами ЭУ ППЭ) показывают, что методы флуктуационной диагностики: регистрация и анализ флуктуаций электрических параметров ЭУ (потенциалов, напряжений или токов) – являются надежным средством определения вида разряда на электродах и предотвращения возникновения нештатных (предавварийных) состояний в работе ЭУ.

Методы флуктуационной диагностики не требуют дополнительного усложнения конструкции ЭУ, поэтому их применение не ведет к снижению надежности ЭУ.

1. УСЛОВИЯ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДОВ В ПЛАЗМЕННЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВКАХ

1.1. МГД-генератор

Основные электрофизические процессы у стенке канала МГДГ связаны с переносом тока между твердым телом и плазмой. В своей основе это те же процессы, что и в классическом газовом разряде. Однако характер протекания разрядных

явлений в МГДГ имеет особенности, которые определяются наличием в качестве “второго электрода” плазмы со сравнительно высокой равновесной концентрацией заряженных частиц и высокими скоростями ионизации и рекомбинации.

В натуральных МГД-генераторах электродные стенки визуально не наблюдаются и о процессах на электродах можно судить лишь косвенно – по выходным электрическим параметрам (току, напряжению, снимаемой мощности МГДГ).

Исследования феноменологии приэлектродных процессов в модельных МГД-установках показали, что различным режимам протекания тока на электродах (диффузный, микродуговой, сильноточный дуговой) соответствуют различные участки приэлектродной вольт-амперной характеристики (ВАХ) с разным углом наклона. При реализации сильноточного режима разряда существенное увеличение средней плотности тока вызывается малым изменением падения напряжения в приэлектродном пограничном слое (см. рис. 1, 2).

Опыты, проведенные на модельных МГД-установках, подтверждены результатами, полученными при обработке вольт-амперных характеристик крупномасштабных МГД-каналов [2]. Здесь было также установлено, что сильноточные дуги, располагаясь на кромках электродов вблизи межэлектродных изоляторов, могут вызывать аварийные разрушения конструкции электродных стенок МГД-каналов (см. рис. 3, 4).

Таким образом, вольт-амперная характеристика МГДГ может служить средством диагностики. Однако в процессе длительной работы МГДГ возможно снижение уровня изоляции между отдельными его элементами и появление токов утечки по конструкции. ВАХ при этом искажается и характерных изломов угла наклона на ней не наблюдается. Это затрудняет определение режима разряда по виду ВАХ.

Наряду с сильноточными дугами на электродах к аварийным ситуациям в МГДГ приводит межэлектродный холловский пробой, т.е. возникновение дуг между смежными (соседними) электродами (катодами или анодами), разделенными межэлектродным изолятором (рис. 1.).

Дуга возникает под действием продольного (холловского) электрического поля E_x в МГД-канале, когда напряжение между смежными электродами ΔV_x достигнет величины напряжения зажигания холловской дуги: $V_{зж} = \Delta V_x = E_x S$, где S – шаг секционирования между электродами.

Таким образом, при работе МГД-генератора (в отсутствие визуальных наблюдений за электродами) особо важное значение приобретает разработка методов контроля сильноточных дуг на электродах и межэлектродного холловского пробоя и в случае их возникновения, оперативное

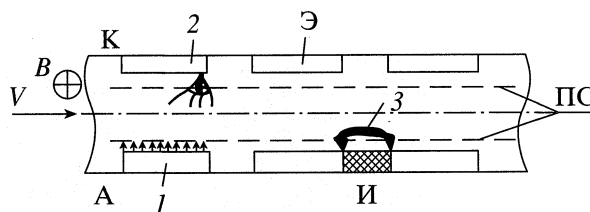


Рис. 1. Различные режимы разряда на электродах в потоке плазмы: 1 – электрод работает в диффузном режиме, 2 – электрод работает в дуговом режиме, 3 – межэлектродный холловский пробой, К – катоды, А – аноды, Э – электрод, И – изолятор, ПС – приэлектродный пограничный слой.

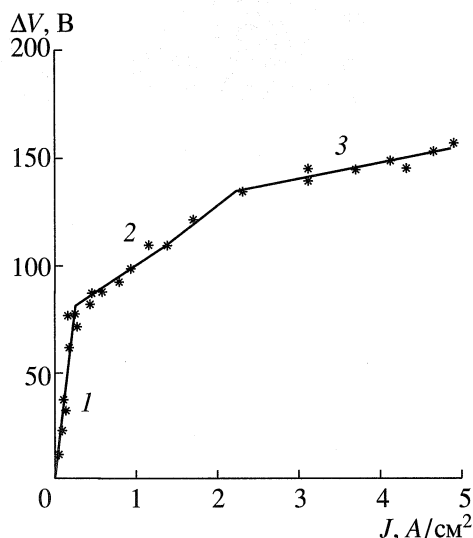


Рис. 2. Типичная вольт-амперная характеристика приэлектродного слоя в модельном МГД-канале: 1 – диффузное протекание тока, 2 – микродуговой режим, 3 – сильноточный дуговой режим.

принятие мер к устранению предаварийных состояний.

1.2. Термоэмиссионный преобразователь

Работа термоэмиссионных преобразователей (ТЭП) основана на явлении эмиссии заряженных частиц с нагретого электрода.

Схематично ТЭП образуется двумя электродами размещенными в герметичном корпусе – высокотемпературным эмиттером и менее нагретым коллектором, разделенными межэлектродным зазором (МЭЗ), который заполнен паром цезия, создающим при работе прибора слабоионизованную плазму – проводящую среду с относительно высоким коэффициентом термоЭДС.

Плотность тока эмиссии (т.е. максимальное количество электронов, которое можно отобрать в единицу времени с единицы поверхности электро-

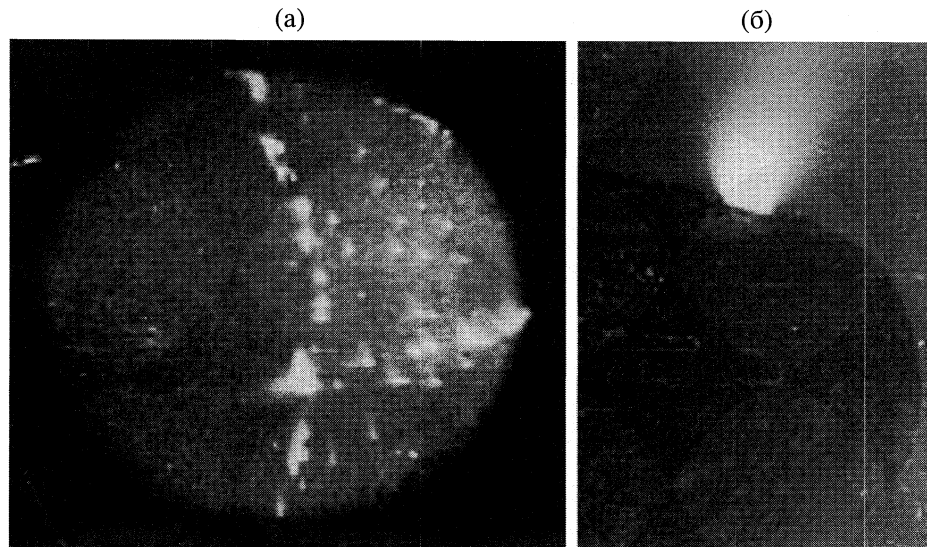


Рис. 3. Фото электродов, работающих в микродуговом (а) и в сильноточном дуговом (б) режимах.

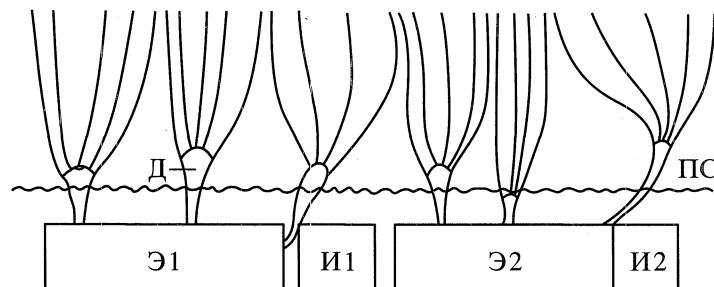


Рис. 4. Модельное изображение протекания токов на электроды при дуговом режиме: Д – дуга, Э – электрод, И – изолятор, ПС – приэлектродный пограничный слой.

да) резко увеличивается с повышением температуры эмиттера и снижением его работы выхода.

Присутствие электропроводной плазмы, а также понижение работы выхода электродов в парах цезия (с этой целью применяют также смесь цезия и бария) обеспечивают экономичную работу прибора при удельной мощности на электродах от 1 до 10 Вт/см² (в демонстрационных устройствах удавалось получать значения удельной мощности до 150 Вт/см²), что позволяет создавать компактные энергоисточники с небольшим относительным весом собственно термоэмиссионной системы.

Современные ТЭП – это приборы с электродами на основе тугоплавких металлов (эмиттер – монокристаллические сплавы вольфрама или молибдена, коллектор – ниобий или молибден, иногда с покрытиями улучшающими электронные и оптические свойства поверхности). Температура эмиттера составляет от 1400 К в цезиевом ТЭП до 2500 К в цезий-бариевом ТЭП. За счет адсорбции цезия на поверхности эмиттера достигается снижение работы выхода электродов до уровня,

необходимого для эффективной работы прибора: 2.6–2.8 эВ на эмиттере и 1.4–1.6 эВ на коллекторе.

Термоэмиссионный преобразователь является источником постоянного тока. Произвольные значения напряжения и силы тока получают, используя последовательно – параллельные соединения ТЭП. Для получения переменного тока используются инверторы. Однако существуют схемы включения и режимы, в которых ТЭП вырабатывает пульсирующий ток, что позволяет выделять переменную составляющую.

Наиболее удачно ТЭП сочетаются с ядерными реакторами и изотопными источниками тепла, обеспечивая значительно большую автономность, чем в случае систем, использующих тепло органических топлив и солнечную энергию.

На рис. 5 схематично изображен ТЭП, встроенный в ядерный реактор, где источником тепла служит реакция деления ядер урана.

Длительные ресурсные испытания ТЭП в составе ядерных энергетических установок показы-

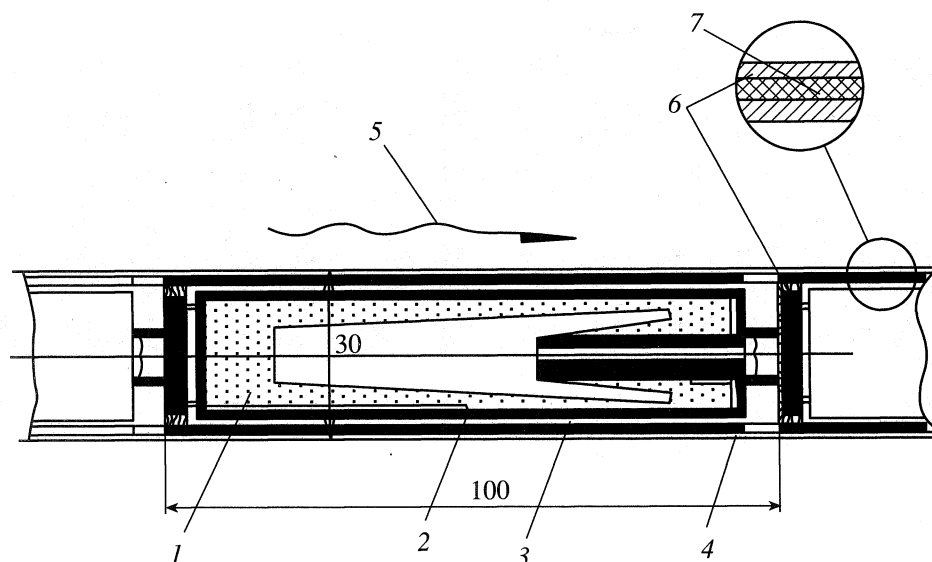


Рис. 5. Термоэмиссионный электрогенерирующий элемент: 1 – источник тепла (делящееся вещество), 2 – эмиттер (катод), 3 – межэлектродный зазор, 4 – коллектор (анод), 5 – охладитель, 6 – наружный кожух, 7 – электроизоляция.

вают возможность достижения 20 тысяч часов и более надежной непрерывной работы ТЭП.

Электроды в термоэмиссионном преобразователе в зависимости от параметров (температура, работа выхода), величины МЭЗ и параметров межэлектродной среды (состав, давление и др.) могут работать в распределенном (диффузионном) или контрагированном (разрядном) режимах.

Диффузионный режим реализуется при условии, что число Кнудсена для плазмы $K_n = d/\lambda \gg 1$ (где d – межэлектродный зазор; λ – длина свободного пробега электрона), а электрическое поле в плазме ниже порога возникновения контрагированного разряда. При этом в МЭЗ реализуется классический режим переноса электронов за счет механизма амбиполярной диффузии в плазме, образующейся в результате поверхностной ионизации цезия.

Переход к разрядному режиму происходит при относительно высокой концентрации плазмы, образующейся в МЭЗ за счет механизма ступенчатой ионизации при столкновении электронов с атомами межэлектродной среды. Этот режим характеризуется высокими значениями плотности тока (до 20 А/см² и выше) и КПД ТЭП (10–12% и выше).

Разрядный режим электродов является основным, используемым в технических устройствах ТЭП.

При работе ТЭП (так же, как и в МГД-генераторе) электроды визуально не наблюдаются. Поэтому разработка надежных методов контроля режима разряда на электродах ТЭП представляет актуальную научно-техническую задачу.

2. РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ФЛУКТУАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПЛАЗМЕННЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВКАХ

2.1. Эксперименты с МГД-генераторами

Диагностическая методика по выявлению межэлектродного пробоя была разработана на основе регистрации и анализа флуктуаций межэлектродного холловского напряжения. В экспериментах с помощью этой методики обнаружено, что возникновение межэлектродных дуг характеризуется появлением в спектре флуктуаций межэлектродного холловского напряжения интенсивного высокочастотного шума с частотой порядка 100 кГц. Данная методика была апробирована при изучении холловского пробоя в МГД-каналах как в приложенных, так и в индуцированных электрических полях. На рис. 6 в качестве иллюстрации приведены осциллограммы флуктуаций напряжения между соседними (смежными) электродами МГДГ при отсутствии (а) и наличии (б) холловской межэлектродной дуги.

Опыты, проводимые на МГД-установках разного масштаба и уровня мощности, выявили, что развитие межэлектродного холловского пробоя в МГД-генераторе в значительной степени определяется не только величиной межэлектродного холловского напряжения, но и режимом разряда на электродах: дуговой режим работы электрода способствует развитию межэлектродного пробоя. Кроме того, дуги на электродах, особенно сильноточные, приводят к интенсивной эрозии и снижают надежность работы МГД-генератора.

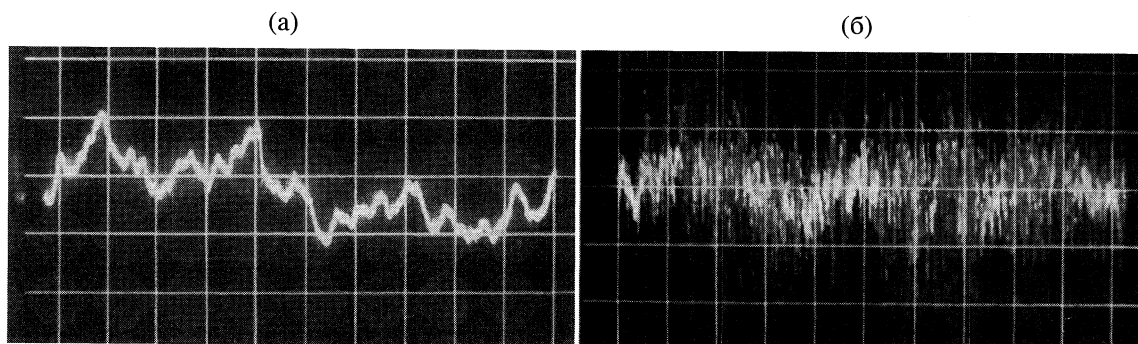


Рис. 6. Осциллограммы флуктуаций напряжения между соседними электродами МГДГ при отсутствии – а и наличии – б холловской межэлектродной дуги. Режим: $B = 1.7$ Тл; $V_{1-2} = 100$ В; а – $I_1 = 50$ А, $I_2 = 30$ А; б – $I_1 = 66$ А, $I_2 = 35$ А. Развертка – 1 мс/дел, чувствительность – 4 В/дел.

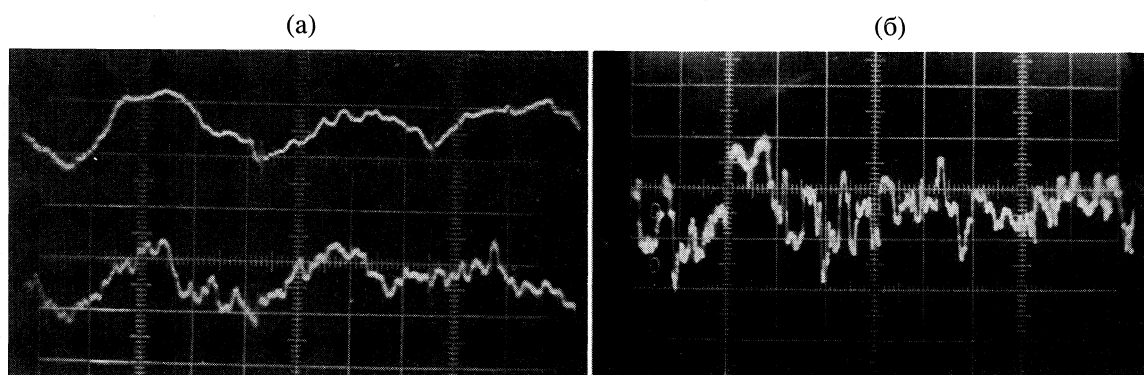


Рис. 7. Осциллограммы флуктуаций прикатодного падения потенциала на электродах, работающих в диффузном, микродуговом – а и сильноточном дуговом – б режимах: развертка – 1 мс/дел, чувствительность – 2 В/дел.

Поэтому их диагностика и контроль приобретают первостепенное значение.

С этой целью определялась взаимосвязь флуктуаций приэлектродного падения напряжения и режима протекания тока на электрод. В качестве иллюстрации рассмотрим результаты, полученные на установке У-25 БМ тепловой мощностью около 25 МВт (рис. 7).

При диффузном режиме разряда на электродах в спектре флуктуаций приэлектродного падения напряжения наблюдались флуктуации с частотой 300 Гц, обусловленные электрической нагрузкой – инвертором. При изменении режима разряда (появлении микродуг на электродах) в спектре флуктуаций приэлектродного падения напряжения появлялись составляющие с частотой 1–10 кГц. Развитие на электродах сильноточной дуги сопровождалось увеличением частоты флуктуаций до десятков кГц.

Таким образом, методы флуктуационной диагностики: регистрация флуктуаций межэлектродного холловского напряжения и флуктуаций приэлектродного падения напряжения в МГД-канале – позволяют в режиме реального времени выявлять

развитие межэлектродного холловского пробоя и дугового режима разряда на электродах.

2.2. Эксперименты с газоразрядным термоэмиссионным прибором – цезий-бариевым таситроном

Возможности использования флуктуационной диагностической методики для контроля работоспособности термоэмиссионных преобразователей были исследованы на основе опытов с сильноточным таситроном – термоэмиссионным прибором для управления током в электрических цепях.

Трехэлектродный полностью управляемый цезий-бариевый таситрон обеспечивает большие плотности тока 10–20 А/см² в разряде на электроде при низком падении напряжения 1.7–2.5 В и низком давлении 10^{-2} Тор в разрядной камере [3].

Модуляция анодного тока в таситроне, а также управление током (как поджиг, так и гашение разряда) осуществляются за счет подачи на управляющий электрод (сетку), расположенный между катодом (эмиттером) и анодом (коллекто-

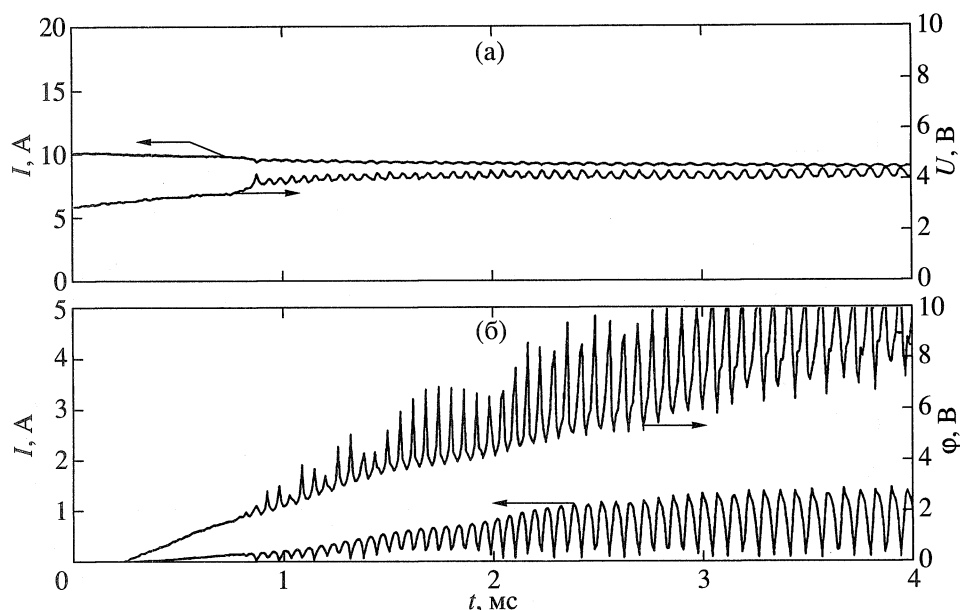


Рис. 8. Штатный режим работы таситрона при отсутствии на сетке управляющих импульсов: а – анодный ток и напряжение, б – ток на зонд и потенциал зонда в области сетки.

ром), разнополярных импульсов напряжения амплитудой 10–40 В.

Экспериментальные методы, используемые для контроля режимов работы таситрона и измерения параметров плазмы разряда в таситроне, в основном зондовые и оптические. С помощью зондов определяются плотность и потенциал плазмы, температура и функция распределения электронов. Анализ оптических спектров излучения плазмы позволяет определить плотность и температуру электронов.

Исследования показали, что разряд в таситроне очень чувствителен к давлению рабочего газа – паров цезия в межэлектродном промежутке. При низких и средних плотностях тока разряд занимает только часть площади электродов и непрерывно перемещается вдоль поверхности электродов. Несмотря на постоянство полного анодного тока, локальная плотность тока непрерывно меняется.

Зондовые измерения параметров плазмы, проведенные в разных областях разряда (катодной, анодной и в ячейках сетки), зафиксировали колебания локальной плотности плазмы практически от нуля до максимальной величины с частотой 10–20 кГц.

Колебания локальной плотности плазмы отражаются на зондовой характеристике. На рис. 8 (в нижней части) представлены изменения во времени электронного тока на один из зондов, расположенных в ячейках сетки в разных местах вдоль поверхности электрода, и потенциала зонда. Видно, что колебания локальной плотности плазмы

приводят к колебаниям тока и потенциала зондов с той же частотой (порядка 10–20 кГц).

В верхней части рис. 8 представлено изменение во времени полного анодного тока и напряжения. Колебания локальной плотности плазмы не проявляются на графике анодного тока, но на графике анодного напряжения наблюдается небольшая модуляция с той же частотой (10–20 кГц), что и колебания локальной плотности плазмы. По мере роста анодного напряжения и анодного тока несколько увеличивается частота колебаний локальной плотности плазмы.

Данные характеристики соответствуют “бегающему” по поверхности электродов разряду. За счет непрерывного перемещения разряда вдоль поверхности электродов концентрация нейтральных атомов в области разряда повышается, что обеспечивает рост скорости ионизации и сохранение баланса между скоростями ионизации и скоростью ухода ионов из области разряда. В этом режиме при подаче на сетку управляющих импульсов напряжения начинается устойчивая модуляция тока.

С ростом давления паров цезия колебания локальной плотности плазмы исчезают, разряд становится стационарным. На рис. 9 в верхней части показано поведение во времени анодного тока и напряжения, а в нижней части – электронного тока и потенциала зонда при стационарном режиме разряда. При исчезновении колебаний локальной плотности плазмы вместе с ними прекращаются колебания зондового тока и напряжения, а также и шумы на анодном напряжении. Стабильность модуляции тока в этом режиме ухудшается.

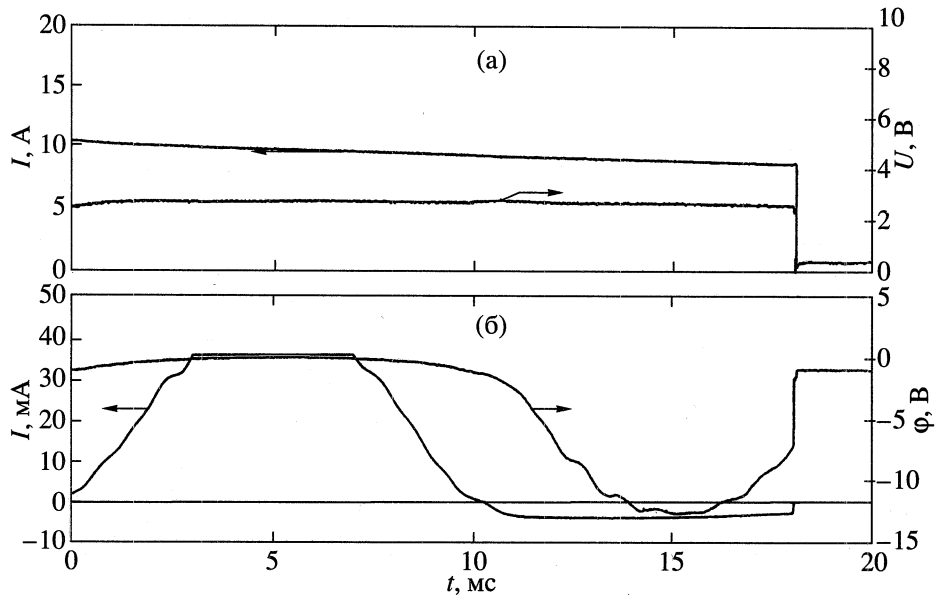


Рис. 9. Нештатный режим работы таситрона при повышенном давлении паров цезия (при отсутствии на сетке управляющих импульсов): а – анодный ток и напряжение, б – ток на зонд и потенциал зонда в катодной области.

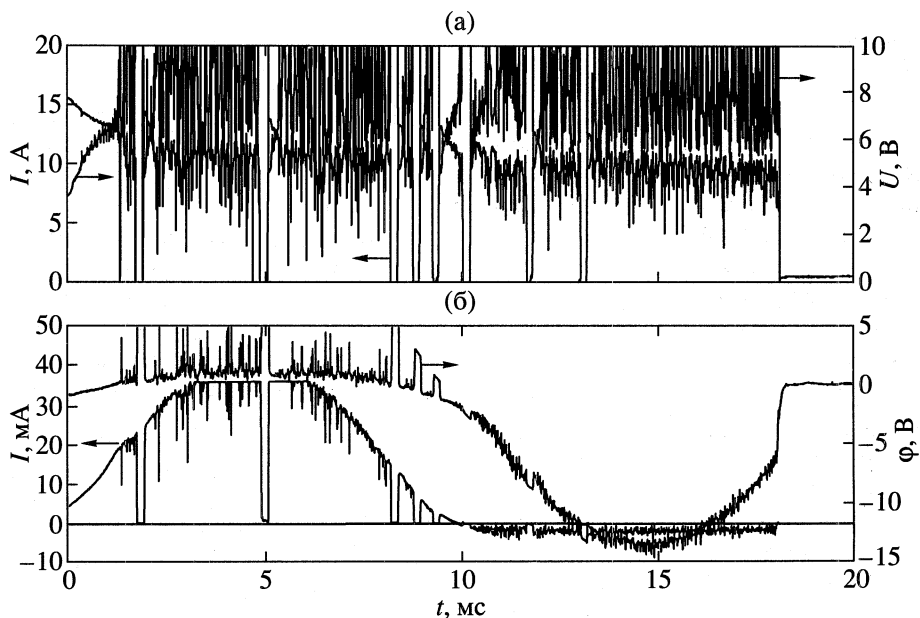


Рис. 10. Нештатный режим работы таситрона при низком давлении паров цезия и отсутствии на сетке управляющих импульсов: а – анодный ток и напряжение, б – ток на зонд и потенциал зонда в катодной области.

При понижении давления паров цезия вынос тяжелой компоненты плазмы из зоны разряда приводит к самопроизвольному его гашению. Новый поджиг разряда становится возможным по прошествии определенного времени, в течение которого концентрация атомов цезия в разрядном промежутке восстанавливается до необходимой для этого величины. Регулярность в процессах поджига и гашения пропадает, появляются

пропуски разрядной фазы в процессе модуляции, и ее стабильность также ухудшается (рис. 10).

Таким образом, для выбора нужного давления паров цезия, при котором возможна устойчивая работа таситрона в режиме модуляции тока, можно использовать частотную характеристику анодного напряжения.

По флуктуациям анодного напряжения и тока таситрона можно осуществлять контроль за его работой и режимом разряда (выявляя штатные и

нештатные режимы, не прибегая к зондовым или спектральным методам диагностики), а именно:

регулярные флуктуации анодного напряжения (с частотой 10–20 кГц) небольшой амплитуды (рис. 8) соответствуют нестационарному, бегающему по поверхности электрода разряду (штатный режим);

одновременные сильные нерегулярные флуктуации анодного напряжения и тока (рис. 10) соответствуют неустойчивому горению разряда с самопроизвольными срывами и повторными зажиганиями (характеризуют нештатный режим);

полное отсутствие флуктуаций анодного напряжения (рис. 9) соответствует стационарному разряду, занимающему всю площадь электрода (нештатный режим).

3. ВАРИАНТЫ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ В ПЛАЗМЕННЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВКАХ

Эксперименты, проведенные с двумя типами плазменных энергоустановок – МГД-генератором и термоэмиссионным таситроном – показали, что метод флуктуационной диагностики, позволяющий в режиме реального времени контролировать электроразрядные процессы на электродах и определять возникновение нештатных состояний, может являться базовым при разработке устройств контроля и повышения надежности и ресурса энергоустановок.

3.1. Устройство для регистрации дугового пробоа и предпробойных состояний

В качестве примера рассмотрим техническое решение задачи автоматизированного управления режимом работы МГД-генератора как наиболее электро- и теплонапряженной плазменной ЭУ, с целью предотвращения аварийных состояний, вызываемых явлениями электрической природы (развитием на электродах сильноточного дугового разряда или возникновением холловского пробоа).

Для обнаружения и контроля данных нежелательных явлений должны быть обеспечены регистрация и анализ флуктуаций межэлектродного и приэлектродного падений напряжения в МГД-канале.

Одна из разработанных схем регистрации флуктуаций потенциалов в МГД-канале показана на рис. 11. Схема содержит емкостной делитель 1, 2, ослабляющий сигнал до безопасного, а также элементы высоковольтной защиты измерительной цепи 3, 4. Емкость в верхнем плече делителя

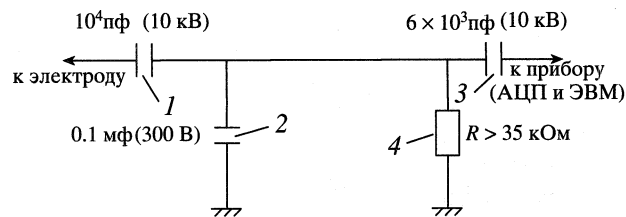


Рис. 11. Схема регистрации потенциалов в МГД-канале.

1 выбирается на двойное рабочее напряжение, в нижнем плече 2 – на напряжение порядка нескольких сотен вольт, исходя из условий измерения переменного сигнала с минимальной частотой – единицы герц.

В случае измерения флуктуаций напряжения два аналогичных делителя подключаются к регистрирующему прибору по дифференциальной схеме. При этом калибровка емкостей в плечах делителя должна быть осуществлена с высокой точностью (не менее 0.1%).

Во входных цепях измерительного прибора предусматриваются защитные емкости 3, рассчитанные на напряжение, превышающее рабочее.

Регистрируемые сигналы через АЦП подаются на вход ЭВМ для их спектрально-корреляционной обработки.

Для контроля потенциалов с большого числа электродов в процессе работы МГДГ следует использовать сканирующее устройство, обеспечивающее автоматическое подключение регистрирующего прибора через емкостной делитель последовательно к потенциальным выводам всех исследуемых электродов.

На основе рассматриваемой схемы (рис. 11) создано устройство, позволяющее в режиме реального времени автоматически осуществлять регистрацию и анализ спектров флуктуаций электрических параметров с целью идентификации групп электродов в МГД-канале, на которых развивается сильноточный дуговой режим разряда или межэлектродный (холловский) пробоа, а также вырабатывать соответствующие сигналы на систему управления (описано в [4]).

3.2. Управление режимом работы ЭУ для предотвращения нештатных ситуаций

а) МГД-генератор. Управляющее воздействие на МГД-генератор в различных случаях возникновения нештатных (предавварийных) состояний может осуществляться с помощью регуляторов, изменяющих уровень выходного напряжения или тока МГДГ (например, уставок инверторов системы нагружения МГДГ).

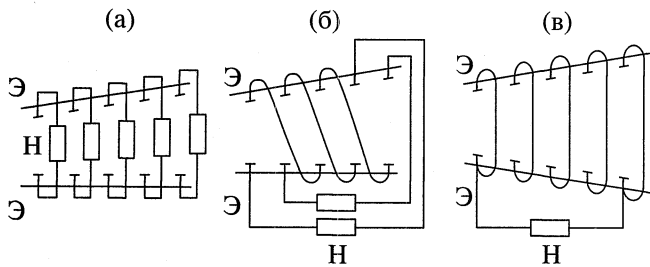


Рис. 12. Схемы подключения МГД-генератора к нагрузке: а – фарадеевский МГД-генератор, б – МГДГ с диагональным соединением электродов, в – МГД-генератор Холла, Э – электроды, Н – нагрузка.

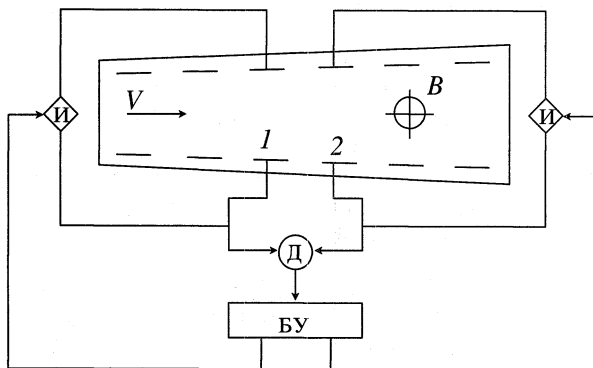


Рис. 13. Блок-схема автоматизированной системы для выявления и предотвращения нештатных состояний в МГД-канале: 1, 2 – электроды МГД-генератора, Д – датчики сигналов с электродов, БУ – блок управления, И – инвертор.

При возникновении между соседними (смежными) электродами МГДГ предпробойного состояния (или состояния неустойчивого холловского пробоя) необходимо для предотвращения аварийной ситуации уменьшить величину межэлектродного напряжения ΔV_x , т.е. напряженность холловского поля в МГД-генераторе E_x , так как $\Delta V_x = E_x S$, где S – шаг секционирования электродов.

Величина холловского поля E_x пропорциональна плотности поперечного тока j_y и параметру Холла β , зависящему от магнитного поля: $E_x \sim \beta \langle j_y \rangle / \langle \sigma \rangle$, где $\beta \sim B$, а $\langle \sigma \rangle$ – средняя электропроводность плазмы.

Таким образом, для снижения напряженности холловского поля необходимо уменьшить плотность тока (полный ток) на электроде, где наблюдается предпробойное состояние, или на группе из одного-двух электродов, к нему прилегающих (рис. 12).

При фарадеевском нагружении МГД-генератора это снижение тока может обеспечиваться изменением уставок инверторов, включенных на противоположные электроды (либо варьированием сопротивления в цепи нагрузки). При диагно-

нальной схеме нагружения для снижения напряженности холловского поля E_x необходимо увеличить продольный ток I_x в МГД-генераторе (за счет снижения продольного напряжения)

$$E_x = \beta \langle j_y \rangle / \langle \sigma \rangle - \langle j_x \rangle.$$

В однонагрузочной схеме МГДГ снижается полный ток МГД-генератора, в многонагрузочной – регулируется продольный ток инвертора на участке, где расположены электроды в предпробойном состоянии.

При обнаружении неустойчивого пробоя между электродами (поскольку это состояние еще не является критическим для работоспособности канала) снижение холловского поля может осуществляться дискретно до прекращения предпробойных явлений, т.е. до исчезновения высокочастотных флуктуаций напряжения с частотой порядка 10 кГц.

При регистрации дугового холловского пробоя (высокочастотных флуктуаций с частотой порядка 100 кГц) необходимо снизить разность потенциалов между соседними электродами до величины, меньшей чем напряжение погасания холловской дуги (до 15–20 В, [5]). Методы снижения те же, что обсуждались выше, но за счет немедленно уменьшения поперечного (фарадеевского) тока.

При возникновении на электроде сильноточного разряда, характеризуемого флуктуациями приэлектродного напряжения с частотой 10 кГц и выше, необходимо снизить ток на этот электрод либо регулированием уставки инвертора в схеме с фарадеевским нагружением, либо за счет увеличения общего продольного тока нагрузки при диагональном нагружении.

В качестве примера рассмотрим принцип построения и работы автоматизированной системы, возмещающей на инверторы нагрузки и предназначенной для выявления и предотвращения нештатных (предаварийных) состояний в МГД-канале. Блок-схема такой системы может иметь вид, показанный на рис. 13.

При появлении в спектре напряжения между электродами 1 и 2 электрических флуктуаций, характеризующих предпробойное состояние или пробой (высокочастотный шум с частотой порядка 100 кГц), вырабатывается управляющий сигнал, который подается на уставки инверторов соответствующих электродов с целью снижения их токов и градиента потенциала между ними (до момента исчезновения в спектре межэлектродных флуктуаций высокочастотного шума).

Аналогичным образом осуществляется контроль и управление режимом работы электродов в МГД-канале (с использованием текущих измеряемых величин тока на электрод и флуктуаций приэлектродного падения потенциала).

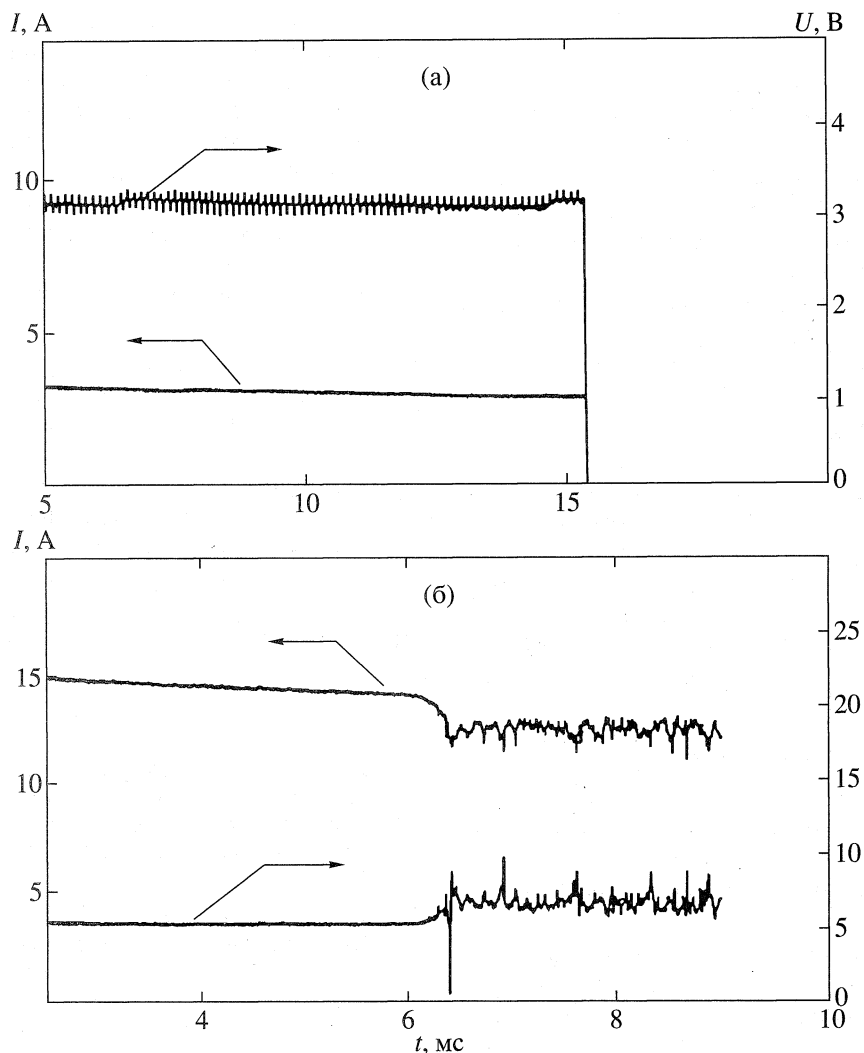


Рис. 14. Характерные флуктуации выходных электрических параметров (напряжения и тока) при работе термоэмиссионного преобразователя – таситрона: а – штатный режим, б – нештатный режим.

б) Термоэмиссионный преобразователь – таситрон. Управляющее воздействие на таситрон можно осуществлять в зависимости от типа флуктуаций его выходных электрических параметров – напряжения и тока:

регулярные (рис. 14а) соответствуют штатному режиму работы таситрона, когда возможна устойчивая модуляция анодного тока;

нерегулярные (рис. 14б) соответствуют нештатному режиму работы таситрона, когда модуляция анодного тока невозможна.

Возникающие в некоторых режимах работы таситрона (в частности с пониженной температурой эмиттера) одновременные сильные нерегулярные флуктуации напряжения U и тока I , представленные на рис. 14б, свидетельствуют о том, что разряд горит неустойчиво; самопроизвольно происходят срывы и повторные зажигания разряда. В режимах с подобными нерегулярными флук-

туациями устойчивая и надежная модуляция анодного тока невозможны.

Чтобы устранить нештатный режим работы таситрона и перевести его в штатный, необходимо (например с помощью системы АСУ) при возникновении сильных нерегулярных флуктуаций анодного напряжения подать соответствующие управляющие сигналы на повышение температуры эмиттера (либо увеличение давления, концентрации цезия, бария в межэлектродном зазоре) до момента исчезновения нерегулярных и появления регулярных флуктуаций в спектре анодного напряжения, типа представленных на рис. 14а.

В штатном режиме работы таситрона возможны два вида разряда:

нестационарный, бегающий по поверхности электрода, характеризуется небольшими по амплитуде регулярными флуктуациями анодного напряжения (с частотой 10–20 кГц). В этом режиме воз-

можно модуляция анодного тока и устойчивая работа таситрона;

стационарный, занимающий всю площадь электрода, характеризуется полным отсутствием флуктуаций анодного напряжения (см. рис. 9). В этом режиме модуляция анодного тока и соответственно устойчивая работа таситрона невозможны.

Чтобы таситрон работал устойчиво, необходимо поддерживать (например с помощью системы АСУ) в его межэлектродном зазоре нестационарный, бегающий по поверхности электрода разряд, характеризуемый регулярными флуктуациями анодного напряжения.

Отсутствие таких флуктуаций свидетельствует о возникновении стационарного разряда. В этом случае необходимо подать управляющие сигналы на снижение, например, концентрации цезия или бария в межэлектродном зазоре (путем уменьшения соответствующих температур цезиевого или бариевого термостатов) до момента появления регулярных флуктуаций в спектре анодного напряжения, типа представленных на рис. 14а.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка методов флукуационной диагностики и проведение исследований с плазменными ЭУ различных типов (МГД-генераторами и термоэмиссионным таситроном) позволили установить следующее.

1. Методы флукуационной диагностики позволяют надежно контролировать электрофизические явления в приэлектродных пограничных слоях и на электродах в отсутствие "оптических" отверстий в стенках ЭУ и возможности визуальных наблюдений за электродами.

2. Регистрация и анализ флукуаций межэлектродного холловского напряжения и флукуаций приэлектродного падения напряжения в МГД-канале позволяет в режиме реального времени выявлять развитие нештатных (предаварийных) состояний, связанных с межэлектродным холловским пробоем и сильноточным дуговым режимом разряда на электродах.

3. Использование методов флукуационной диагностики в сильноточном термоэмиссионном преобразователе – таситроне позволяет осуществлять контроль за режимом разряда на электродах, выявляя штатные и нештатные режимы его работы. Причем данный контроль (и последующее управление в режиме реального времени) можно осуществлять по флукуациям анодного (полного) напряжения и тока таситрона, не прибегая к зондовым или спектральным методам диагностики.

4. На основе методов флукуационной диагностики разработаны варианты практической реализации автоматизированных контрольно-измерительных устройств, обеспечивающих также функции управления и защиты ЭУ от нештатных (предаварийных) состояний в процессе их работы, с целью повышения надежности и ресурса ЭУ.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 01-02-16207).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов Н.Н. Способы контроля и предупреждения предаварийных состояний при работе энергоустановок на основе методов прямого преобразования энергии // Изв. РАН. Энергетика. 1997. № 2. С. 28.
2. Баранов Н.Н., Бенилов М.С., Бочкарев Г.Г. и др. Экспериментальное исследование падений напряжения в пограничных слоях крупномасштабных МГД-каналов // ТВТ. 1986. Т. 24. № 2. С. 370.
3. Кайбышев В.З., Кузин Г.А., Мельников В.М. О возможности использования термоэмиссионного преобразователя для управления током в электрических цепях // ЖТФ. 1972. Т. 42. № 6. С. 1265.
4. Баранов Н.Н., Бузников А.Е., Кайбышев В.З. О возможности контроля и управления режимом разряда на электродах в плазменных энергоустановках // Изв. РАН. Энергетика. 1999. № 2. С. 64.
5. Ковбасюк В.И., Баранов Н.Н., Исэров А.Д., Климовский И.И. Возникновение межэлектродных дуг и электрические флукуации в МГД-канале // ТВТ. 1977. Т. 15. № 6. С. 1294.