

Министерство образования Республики Беларусь Учреждение образования  
Белорусский государственный университет информатики и  
радиоэлектроники

УДК 621.317.38: 621.317.78

Кандрукевич Иван Николаевич

Устройство контроля мощности, отдаваемой генератором в плазменную  
нагрузку

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание степени магистра технических наук

по специальности 1-38 80 02 «Оптические и оптико-электронные приборы и  
комплексы»

---

Научный руководитель  
Бордусов Сергей Валентинович  
профессор, докт. техн. наук

---

Минск 2020

## КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Нестационарные электрические разряды широко применяются в различных отраслях техники. Энергия, высвобождаемая этими разрядами, расходуется на инициирование сложных физико-химических процессов, поэтому чрезвычайно важно иметь достоверную информацию о распределении энергии на протяжении разряда, т.е. мощности, что позволяет практически путем определить оптимальные режимы протекания процессов. При проведении исследований газоразрядной плазмы в условиях внешних воздействий (электромагнитные поля, излучения и др.) возникает необходимость оценить степень их влияния на разряд по изменению мощности, поглощаемой разрядом.

Однако, определение мощности нестационарного электрического разряда затруднительно, поскольку это требует проведения большого числа замеров в течение времени протекания разряда. Конечно, данный способ возможно реализовать при помощи ЭВМ, но помимо того, что это потребует немалых затрат на приобретение ЭВМ, создание уникального интерфейса и программного обеспечения, данный способ становится нецелесообразным в случае проведения комплексных измерений, когда все остальные параметры фиксируются стандартной аппаратурой.

Цель магистерской диссертации – изучение характеристик работы устройства, позволяющего повысить точность измерения при упрощении расчёта. Сущность способа определения активной мощности, поглощаемой нагрузкой заключается в измерении значений тока и напряжения на резистивном датчике тока и резистивном делителе напряжения. С выходов датчиков снимаются сигналы, пропорциональные мгновенным значениям тока и напряжения на нагрузке. Сигнал с выхода аналогового перемножителя поступает на вход интегрирующего АЦП, который выполняет интегрирование входного сигнала и его дальнейшее преобразование в цифровую форму с последующим выводом на цифровой индикатор.

Главные преимущества использования именно такой схемы построения прибора позволяет получить ряд существенных преимуществ перед существующими устройствами: повышение точности измерения за счёт устранения промежуточных устройств преобразования переменного сигнала в эквивалентное ему постоянное значение, исключение необходимости промежуточного преобразования аналогового сигнала в цифровой код с последующим его перемножением; возможность измерять активную мощность, поглощаемую нагрузкой, при этом тип проводимости самой нагрузки может быть неизвестен, или изменяться со временем, что характерно для различных технологических сред, которые и могут выступать в качестве нагрузки.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с крупными научными программами и темами**

Электрические разряды нашли широкое применение при проведении различных плазменных процессов, которые в свою очередь, являются основой для создания и проведения широкого спектра операций и процессов в области энергетики, экологии, топливно-энергетического комплекса. В связи с этим чрезвычайно важно иметь достоверную информацию о распределении энергии на протяжении разряда, т.е. мощности, что позволяет практическим путем определять оптимальные режимы протекания процессов. Так, при проведении исследования газоразрядной плазмы в условиях внешних воздействий возникает необходимость оценить степень их влияния на разряд по изменению мощности, которая поглощается разрядом.

Работа выполнялась в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (научный руководитель – д.т.н., профессор Бордусов С.В.).

### **Цель и задачи исследования**

Цель данной работы – исследовать простой и недорогой широкополосный прибор контроля мощности, отдаваемой генератором электрических импульсов в плазменную нагрузку.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие основные задачи:

1. Провести анализ методов контроля и измерений величины проходящей мощности.
2. Рассмотреть конструктивные решения и изучены принципы работы измерителей мощности.
3. Произвести калибровку измерителя проходящей мощности.
4. Исследовать работу измерителя мощности в цепи «генератор – плазменная нагрузка».

## **Личный вклад соискателя**

Все основные результаты, изложенные в диссертационной работе, получены при непосредственном участии соискателя. Научному руководителю С.В. Бордусову принадлежат постановка ряда основных задач и интерпретация полученных результатов. Исследование работы измерителя проходящей мощности в цепи «генератор – плазменная нагрузка» осуществлялись совместно с коллегами с кафедры электронной техники и технологии БГУИР.

## **Апробация результатов диссертации**

Результаты исследований, включенные в диссертацию, докладывались на следующих международных и республиканских конференциях: 55-я Юбилейная научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (Минск, Беларусь, 22-26 апреля 2019 года); 12-я Международная научно-техническая конференция молодых ученых и студентов «Новые направления развития приборостроения» (17-19 апреля 2019 года); 56-я Научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (Минск, Беларусь, 18-20 мая 2020 года).

## **Опубликованность результатов диссертации**

По материалам диссертации опубликовано 4 печатные работы в сборниках трудов и материалах международных конференций. Общий объем публикаций по теме диссертации составляет 4 авторских листа.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников, приложения. Общий объем диссертационной работы составляет 72 страницы, из них 53 страницы основного текста, 36 рисунков на 30 страницах, 9 таблиц на 9 страницах, списка использованных источников из 39 наименований, включая 3 собственных публикации автора, на 4 страницах, 2 приложения.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, показана связь работы с научными темами, сформулированы цель и задачи исследований, даны сведения об объекте исследования и обоснован его выбор. Приведены сведения о личном вкладе соискателя, апробации результатов диссертации, их опубликованности, а также о структуре и объеме диссертации.

**Первая глава** содержит обзор литературы, включающий способы и методы измерения величины проходящей мощности низкочастотных сигналов в трактах передачи энергии. Различают косвенный и прямой методы измерения мощности в низкочастотном диапазоне.

В диапазоне частот 1...10000 Гц при измерениях электрической мощности используют ваттметры электродинамической системы. Как и у всех приборов электродинамической системы, принцип действия ваттметра основан на том, что угол поворота рамки (со стрелкой) измерительного механизма пропорционален произведению токов, умноженному на косинус угла  $\varphi$  между ними.

Косвенное измерение проходящей мощности производится путем определения напряжения нагрузки и тока, текущего через нее. В зависимости от того, изменяется ли мгновенная, средняя, активная, реактивная или полная мощность в средствах измерения производится перемножение мгновенных, действующих или средних значений  $U$  и  $I$  с последующим интегрированием произведения или без него.

Во **второй главе** рассмотрены конструктивные решения, технические характеристики и принципы работы существующих измерителей проходящей в нагрузку мощности.

Низкочастотные ваттметры бывают: аналоговые и цифровые. В качестве примера аналогового рассмотрен ваттметр типа Ц301. Цифрового – приборы серии СР3010 и ЦЛ8516. В цифровых ваттметрах используется специальный алгоритм цифровой обработки сигналов, а измеренное значение отображается на цифровом табло ваттметра в единицах измеряемой величины.

В радиочастотном диапазоне большую группу ваттметров образуют ваттметры поглощаемой мощности.

Классификация данных приборов проведена по методам проведения измерений: по методу пикового вольтметра, термоэлектрическому, калориметрическому, терморезистивному.

В **третьей главе** подробно рассмотрена конструкция и работа измерителя мощности низкочастотных недетерминированных сигналов произвольной формы.

Измеритель мощности состоит из датчиков тока и напряжения, перемножителя входных сигналов, интегрирующего АЦП и цифрового индикатора.

**Датчик напряжения** представляет собой делитель напряжения, который стоит параллельно нагрузке. **Датчик тока** состоит из одного резистора номиналом в 1 Ом, который подключен последовательно нагрузке. С выхода датчиков снимаются сигналы, пропорциональные мгновенным значениям тока и напряжения на нагрузке. Основу **перемножителя** составляет микросхема аналогового прецизионного перемножителя **КР525ПС2А**, который осуществляет перемножение мгновенных значений сигналов тока и напряжения с выхода датчиков. Сигнал с выхода аналогового перемножителя поступает на вход **интегрирующего АЦП**, который выполняет интегрирование входного сигнала и его дальнейшее преобразование в цифровую форму с последующей выдачей на цифровой индикатор. В качестве АЦП использовалась БИС **КР572ПВ5А**.

Показаны схемы подключения измерителя для двух типов нагрузок: изолированной и с заземлением.

Максимальный предел измерения экспериментального образца прибора составляет 4,4 кВт при напряжении на нагрузке до 1790 В и токе до 2,5 А с погрешностью до 2,8%.

Расширение диапазона измеряемых мощностей возможно за счет применения дополнительных внешних делителей в датчиках тока и напряжения. Прибор является универсальным, поскольку позволяет производить измерение активной мощности на комплексной нагрузке с любым характером реактивностей, при этом форма сигнала на нагрузке может быть произвольной.

В **четвертой главе** описан процесс проведения калибровки измерителя мощности низкочастотных недетерминированных электрических сигналов произвольной формы. Для получения наилучшей точности в условиях эксплуатации используют три базовых типа регулировки:

*Одноточечная* регулировка при нулевом входном сигнале (Регулировка нуля). Подстройка нуля проводится путем регулировки сопротивления подстроечных резисторов для входов  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  и  $\Delta Z$  микросхемы перемножителя КР525ПС2А.

*Двухточечная* регулировка при эталонном значении мощности. (в качестве эталона выступали лампы накаливания (45, 75, 100, 150 и 200 Вт). ЛН выбраны эталоном, т.к. их коэффициент мощности  $\cos\varphi = 1$ , а значит они являются полностью активной нагрузкой. В результате калибровки зависимость измеренной прибором мощности от теоретически рассчитанной получилась линейной, что говорит о правильно проведенной установке нуля.

Многоточечная регулировка проводится на серии значений мощности. При выполнении этого процесса используется последовательность шагов измерений мощности в диапазоне датчика для максимально полной характеристики функций. Для данного этапа были опробованы следующие формы сигналов: синусоидальный, однополупериодный, двухполупериодный. В качестве нагрузки использовался реостат с максимальным сопротивлением 600 Ом.

Были проведены все три базовых типа регулировки в условиях эксплуатации. После проведения калибровки, погрешность измерения составляет не более 2,8 %, что говорит о достаточно высокой точности прибора.

В пятой главе рассматривается работа измерителя мощности в цепи «генератор – плазменная нагрузка».

Рассмотрены формы сигналов с выхода генератора, представлена схема подключения измерителя в тракт передачи сигнала, зафиксированы значения мощности на плазменной нагрузке. По полученным значениям построен график зависимости мощности от напряжения для разных значений давления в камере (Рисунок 1).

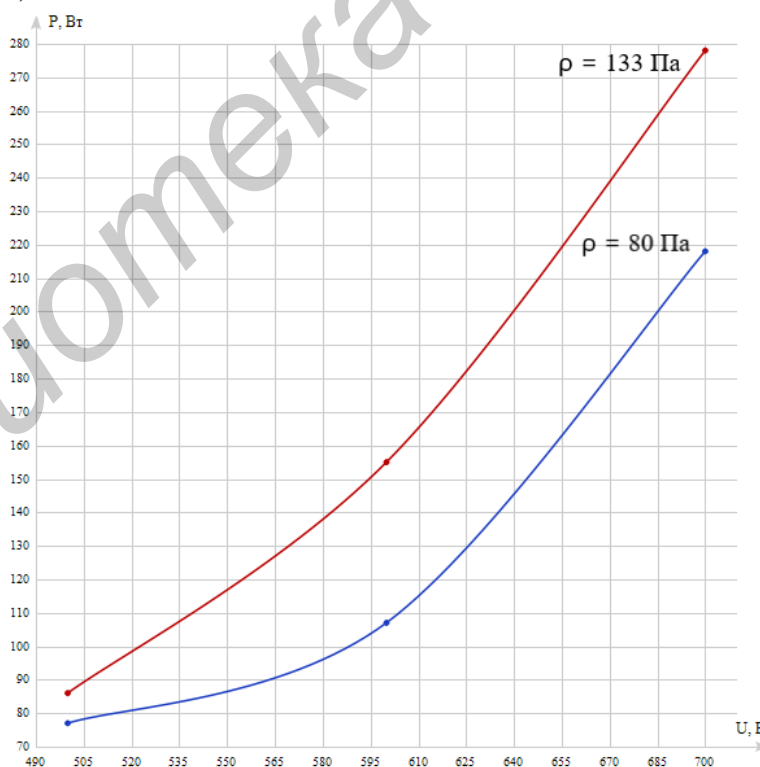


Рисунок 1 – Зависимость мощности, отдаваемой генератором в плазменную нагрузку от значения выходного напряжения генератора для  $\rho = 80$  Па и  $\rho = 133$  Па

По полученным графикам, согласно ВАХ тлеющего разряда, можно сделать вывод, что измеренные таким образом значения мощности, отдаваемой генератором в плазменную нагрузку, являются достоверными,

приближаясь при этом к зоне аномального тлеющего разряда, когда плотность тока превышает нормальную, а катод полностью покрыт разрядом.

Таким образом, устройство контроля мощности, используемое в составе плазменного технологического оборудования, позволяет получать достоверные результаты измерений. Главное преимущество измерителя мощности сигналов низкочастотного диапазона – измерение активной мощности, поглощаемой нагрузкой, которая является одним из параметров технологического процесса, по которому можно судить об интенсивности протекания процесса, прогнозировать качество конечного продукта, производить выбор оптимальных режимов обработки. Использование измерителя мощности в составе электротехнологической установки позволяет повысить уровень автоматизации установки и точность поддержания параметров процесса в заданном диапазоне.

Библиотека БГУИР



## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Основные результаты диссертации**

1. В ходе выполнения диссертационной работы были проанализированы методы контроля и измерения величины проходящей мощности сигналов различной формы в НЧ диапазоне.

2. Был проведен анализ конструктивных решений и принципов работы существующих измерителей проходящей в нагрузку мощности, используя эти данные, был разработан простой и недорогой измеритель мощности НЧ недетерминированных сигналов произвольной формы.

3. В диссертации рассмотрена конструкция измерителя мощности низкочастотных недетерминированных электрических сигналов произвольной формы, его принцип работы, основанный на измерении значений тока и напряжения на резистивном датчике тока и резистивном делителе напряжения. В работе так же описан процесс установки нуля измерителя мощности и процесс проведения калибровки одноточечным, двухточечным и многоточечным способами. После проведения калибровки, погрешность измерения составила не более 2,8 %, что говорит о достаточно высокой точности прибора.

4. В ходе исследования работы измерителя мощности в цепи «генератор – плазменная нагрузка» были рассмотрены формы сигналов с выхода генератора, представлена схема подключения измерителя мощности в тракт передачи сигнала, зафиксированы значения мощности на плазменной нагрузке. По полученным значениям построен график зависимости мощности от напряжения для различных значений давления. По полученному графику, согласно ВАХ тлеющего разряда, было установлено, что измеренные таким образом значения мощности, отдаваемой генератором в плазменную нагрузку, являются достоверными, приближаясь при этом к зоне аномального тлеющего разряда, когда плотность тока превышает нормальную, а катод полностью покрыт разрядом.

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Разработанный измеритель мощности, отдаваемой генератором в плазменную нагрузку предлагается использовать на предприятиях Республики Беларусь. Использование измерителя мощности в составе электротехнологической установки позволяет повысить уровень автоматизации установки и точность поддержания параметров процесса в заданном диапазоне.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Кандрукевич, И.Н. Устройство контроля мощности, отдаваемой генератором в плазменную нагрузку / И.Н. Кандрукевич, М.С. Клакевич // Материалы 55-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники». Мн.: БГУИР, 2019. с. 187.

2. Кандрукевич, И.Н. Устройство контроля мощности в составе плазменной технологической установки / И.Н. Кандрукевич // Материалы 12-й Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Новые направления развития приборостроения». Мн.: БНТУ, 2019. с. 120.

3. Кандрукевич, И.Н. Измеритель мощности низкочастотных сигналов / И.Н. Кандрукевич // Материалы 56-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники». Мн.: БГУИР, 2010. с. 305.

4. Кандрукевич, И.Н. Методы и измерители мощности сигналов различной формы / И.Н. Кандрукевич // Материалы 56-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники». Мн.: БГУИР, 2020. с. 127.