

**На правах рукописи**



**ОРЛОВ Алексей Вениаминович**

**ИМПУЛЬСНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ  
С АВТОКОРРЕКЦИЕЙ МОЩНОСТИ  
(развитие теории, исследования и разработка)**

Специальность 05.13.05 – Элементы и устройства  
вычислительной техники и систем управления

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Стерлитамак - 2010**

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Стерлитамакская государственная педагогическая академия им. Зайнаб Бишевой»  
на кафедре теоретической физики и методики обучения физике

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Галиев Анвар Лутфрахманович**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Миловзоров Георгий Владимирович**  
Уфимский государственный авиационный технический университет, зав. кафедрой промышленной электроники

доктор технических наук, доцент  
**Сушко Борис Константинович**  
Башкирский государственный университет, профессор кафедры статистической радиофизики и связи

Ведущее предприятие: ГОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Филиал в г. Стерлитамаке

Защита состоится «2» июля 2010 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д212.288.02 при Уфимском государственном авиационном техническом университете по адресу: 450000, г. Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12, УГАТУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уфимского государственного авиационного технического университета.

Автореферат разослан «2» июня 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д. т. н., профессор



Г.Н. Утляков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Актуальность.* При исследовании тепловых зависимых нелинейных компонентов, твердых электролитов, биологических объектов и т.п. требуется получение высокоточной, объективной, воспроизводимой при повторных измерениях информации об электрических параметрах исследуемых объектов. В большинстве случаев техническое устройство и объект измерений взаимодействуют друг с другом. Устройство измерения, воздействуя на объект, вносит в него электрическую энергию в форме джоулевой теплоты, количество которой зависит от параметров, как самого объекта исследования (ОИ), так и от условий воздействия.

На практике часто используются измерения параметров исследуемого объекта, проводимые в режиме заданного напряжения или тока. Однако такие методы не всегда удовлетворяют требованиям воспроизводимости и точности результатов. Вносимая в объект исследования энергия, в форме постоянного приложенного напряжения или постоянного по величине тока, зависит от энергоемкости и теплоемкости самого объекта. Измерительные устройства, работающие в режиме заданного тока или напряжения, могут неоднозначно воспроизвести значения одного и того же измеряемого параметра ОИ, т.к. при этом результат измерения будет зависеть от термодинамического состояния ОИ и измерительные преобразователи покажут разные значения измеряемого параметра одного и того же объекта. Очевидно, в этом случае возникает неопределенность энергетического режима измерения, что осложняет получение требуемых метрологических характеристик измерительного устройства и воспроизводимости измерения. При создании контрольно-измерительной аппаратуры для технологических и медицинских установок особо важным фактором является определенность и однозначность энергетического режима объекта. Поэтому для получения воспроизводимости при повторных измерениях, следует поддерживать постоянной вносимую в объект энергию и мощность, что будет способствовать сохранению термодинамического состояния ОИ. Электронные устройства, которые обеспечивают неизменное значение электрической мощности, рассеиваемой в сопротивлении нагрузки, с погрешностью, не превышающей заданное значение, получили название измерительных генераторов заданной мощности (ИГЗМ).

В работах ряда авторов описываются результаты исследований аналоговых и цифровых ИГЗМ и общие принципы их построения. Анализ соответствующих источников показал, что существующие аналоговые и цифровые ИГЗМ не достаточно полно удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям, в частности, имеют сравнительно высокую погрешность

поддержания заданной мощности, а также требуемые метрологические характеристики могут обеспечивать в относительно узком динамическом диапазоне сопротивлений исследуемого объекта. Например, при исследовании кожного покрова требуется ИГЗМ, работающий в динамическом диапазоне сопротивлений нагрузки более 100.

При построении современных ИГЗМ актуальны также вопросы миниатюризации и повышения экономичности измерительных генераторов. Миниатюризация и повышение экономичности данных типов генераторов позволит использовать их в качестве индивидуальных устройств диагностирования состояния организма в медицинских и других целях с автономными источниками питания.

Решение научно-технических задач, связанных с дальнейшим развитием теории ИГЗМ и созданием научной базы для проектирования подобных генераторов, позволит разработать универсальные микроэлектронные многофункциональные узлы и улучшенные структуры генераторов заданной электрической мощности, открывающие новые возможности в деле контроля, измерения и диагностики состояния объектов живой и неживой природы. В этом ключе тема диссертационной работы является актуальной и современной. Актуальность решаемых задач диссертационной работы подтверждается также тем, что данная тематика была отмечена грантом Минобразования РФ под названием «Измерительные генераторы заданной мгновенной электрической мощности», а так же включена в программу сотрудничества Минобразования и Минобороны РФ, выполненным на кафедре ИИТ УГАТУ под руководством доктора технических наук, профессора Гусева В.Г.

**Целью данной работы** является исследование новых способов формирования сигналов измерительных генераторов малой заданной электрической мощности; разработка новых схемных решений, которые позволят улучшить технические характеристики, повысить экономичность и надежность исследуемых устройств в целом.

**Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:**

1. Обобщены известные подходы и методы для оценки параметров исследуемых теплозависимых нелинейных компонентов, твердых электролитов, биологических и других объектов. Выявлены области применения ИГЗМ, принципы их построения и технические требования, предъявляемые к ним. Проведена классификация измерительных преобразователей ИГЗМ.

2. Разработаны и исследованы новые структурные и принципиальные схемы преобразователей информации и формирователей импульсов для ИГЗМ.

3. Для поддержания мощности, а также для некоторых схем импульс-

ных ИГЗМ и энергии, воздействия на заданном уровне с высокой точностью в структуры ИГЗМ на базе разработанных преобразователей информации и формирователей импульсов введены схемы автокоррекции.

4. Разработаны математические модели, позволяющие проводить оценку основных технических характеристик и возможностей ИГЗМ.

5. Проведены экспериментальные исследования разработанных ИГЗМ

**Методы исследования.** Для получения научных результатов в диссертационной работе были использованы методы и подходы из области теоретических основ электротехники, теории электрических цепей и электроники. При этом моделирование и исследование свойств рассматриваемых схем выполнялось с помощью прикладных программных пакетов *MathCad 2000 Professional* и *Micro Cap v.8.1*.

**На защиту выносятся:**

1. Классификация измерительных преобразователей ИГЗМ. Наиболее важные уточненные требования к измерительным генераторам заданной мощности.

2. Структурные и принципиальные схемы преобразователей информации для ИГЗМ и формирователей импульсов постоянной энергии и мощности для измерительных генераторов малой заданной мощности.

3. Структурные и принципиальные схемы импульсных ИГЗМ с автокоррекцией мощности.

4. Математические модели разработанных схем ИГЗМ.

5. Результаты исследований разработанных схем ИГЗМ, полученные с помощью их математических моделей, компьютерного моделирования и экспериментальным путем.

**Научная новизна** исследований, проведенных в работе, заключается в следующем:

– предложен новый метод оценки параметров и свойств исследуемых объектов, отличающийся от известных поддержанием на заданном уровне не только мощности, но и энергии импульсов воздействия;

– разработаны и исследованы высокоэкономичные информационные преобразователи и формирователи импульсов, предназначенные для работы в составе измерительных цепей малой мощности;

– предложен оригинальный способ формирования измерительного сигнала в ИГЗМ с автокоррекцией мощности;

– разработаны математические модели импульсных ИГЗМ со схемой стабилизации мощности, исследованы их основные характеристики, установлены факторы, влияющие на погрешность задания мощности;

– разработаны и исследованы экономичные преобразователи информации, которые могут использоваться как автономные ИГЗМ в системах медико-биологического назначения;

– оценены технические возможности разработанных схем ИГЗМ.

***Практическая ценность работы.***

Разработаны схемы импульсных генераторов заданной мощности и энергии, которые могут быть использованы при контроле, измерении и диагностике состояния объектов живой и неживой природы, создании датчиков физических величин, а также при медицинских исследованиях.

Разработана схема высокоэкономичного многофункционального преобразователя информации для биологических датчиков, позволяющая проводить измерительные операции при питании прибора от автономного источника.

Разработаны схемы формирователей импульсов для ИГЗМ с автоматической коррекцией заданной мощности и энергии. В результате исследований разработанных схем предложены рекомендации по повышению стабильности заданной мощности.

В разработанных схемах предусмотрено управление через интерфейс компьютера.

***Апробация работы.*** Основные вопросы диссертации докладывались и обсуждались на VI Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Современные проблемы радиоэлектроники» (Красноярск, 2004 г.), Всероссийской научной конференции «Современные проблемы физики и математики» (Уфа, 2004 г.), VIII Всероссийской с международным участием научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Современные проблемы радиоэлектроники» (Красноярск, 2006 г.), III Межвузовской научно-практической конференции молодых ученых «Молодежь. Прогресс. Наука» (Стерлитамак, 2008 г.), Межвузовской научно-практической конференции молодых ученых «Роль классических университетов в формировании инновационной среды регионов» (Уфа, 2009 г.), V Международной конференции-выставки «Промышленные АСУ и контроллеры 2010: от А до Я» (Москва, 2010 г.).

***Публикации.*** Основные научные результаты по теме диссертации изложены в 12 статьях, опубликованных в журналах и научных сборниках, из них 3 в издании, рекомендованном ВАК.

***Структура и объем работы.***

Диссертация состоит из введения, четырех глав основного текста, заключения и списка литературы. Общий объем диссертационной работы составляет 165 листа машинописного текста. Работа содержит 104 иллюстраций и 6 таблиц. Список литературы содержит 109 наименований.

**ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность выполненной научной работы, сформулированы цели и задачи исследований, приведены научные результаты, выносимые на защиту, указана их научная новизна и практическая ценность.

**В первой главе** рассмотрены области применения измерительных

генераторов заданной мощности. Показана возможность использования ИГЗМ как одного из атрибутов измерительных устройств, с помощью которых определяются электрические параметры биологических объектов.

Анализ научной литературы показал, что для измерения электрических параметров, с помощью которых можно оценивать состояние исследуемых объектов необходимо использовать один из следующих методов: режим заданного электрического напряжения, режим заданного электрического тока, режим заданной электрической мощности. В данной работе предложено проводить исследования ОИ обеспечив постоянство как мощности так и энергии импульсов воздействия.

Рассмотрены измерительные преобразователи мощности с функциональным преобразованием входных величин. Проанализированы условия физической реализуемости экономичных ИГЗМ.

На основе проведенного анализа научной литературы сформулированы следующие требования, которым должны удовлетворять маломощные экономичные ИГЗМ:

- 1) пределы изменения мощности 0,01-10 мВт;
- 2) обеспечение требуемой точности установки заданной мощности;
- 3) обеспечение стабильности заданной мощности в широком интервале времени;
- 4) малое время восстановления заданного режима при изменении сопротивления нагрузки;
- 5) технологичность конструкции;
- 6) малые габариты и вес;
- 7) возможность работы от автономных источников питания.

В результате анализа и систематизации известных способов и методов построения ИГЗМ, сформулированы основные задачи исследования, решение которых будет способствовать достижению поставленной цели.

**Вторая глава** посвящена разработке и исследованию многофункциональных преобразователей информации для автономных ИГЗМ с импульсной обработкой сигналов. Рассмотрены вопросы возможности использования различных способов преобразования информации: как аналоговых, так и импульсных или цифровых. Независимо от типа измерительного прибора, требования, предъявляемые к преобразователям информации едины. Их должны отличать: высокая экономичность, линейность характеристики преобразования, малые габариты и возможность реализации в интегральном исполнении.

Разработанный многофункциональный преобразователь информации для ИГЗМ (рис. 1) синтезирован на элементах цифровой логики КМОП-структуры, работающих при околопороговых значениях напряжения питания, отличающийся от существующих преобразователей большим числом функциональных возможностей и малой потребляемой мощностью. Установ-

лена возможность обеспечения потребляемой мощности до 100 мкВт.

На рис. 1 преобразователь информации представлен в режиме преобразования сопротивления  $R_0$  в частоту. Источниками информации могут служить параметрические датчики с соответствующими характеристиками, делитель опорного напряжения стабилизатора и т.д. В общем случае источник информации может быть подключен в любой участок цепи обратной связи, например, вместо резисторов  $R_2$  или  $R_3$ , в случае параметрического емкостного датчика – вместо конденсатора  $C$  и т.д.

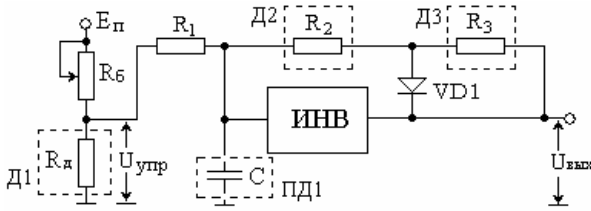


Рисунок 1 – Принципиальная схема преобразователя информации ( $D1, D2, D3$  – датчики;  $PD1$  – параметрический датчик)

На основе анализа работы и экспериментальных исследований получены аналитические выражения для расчета наиболее значимых параметров преобразователя информации, в частности, длительности вырабатываемых импульсов и межимпульсного промежутка:

$$t_2 = \frac{\Delta_c}{\frac{1}{C} \left( \frac{E_n - U_{\Delta-}}{R_d} - \frac{U_1 + \Delta_c / 2}{R_1} \right)} \quad \text{и} \quad t_1 = \frac{\Delta_c}{\frac{1}{C} \left( \frac{U_{nop}}{R_{dp}} + \frac{U_1 + \Delta_c / 2}{R_1} \right)},$$

где  $t_2$  – длительность импульса;  $t_1$  – длительность межимпульсного интервала;  $\Delta_c = U_{\Delta+} - U_{\Delta-}$ ;  $U_{\Delta+}$  и  $U_{\Delta-}$  – максимальное и минимальное значения напряжений на конденсаторе, соответствующие моменту переключения компаратора;  $U_1 = U_{упр} - U_{\Delta+}$ ;  $U_{упр}$  – управляющее (входное) напряжение преобразователя информации;  $E_n$  – напряжение источника питания;  $U_{nop}$  – пороговое напряжение логического элемента – инвертора ( $ИНВ$ );  $R_d$  и  $R_{dp}$  – сопротивления цепей заряда и разряда конденсатора.

Многофункциональный преобразователь информации можно использовать в качестве преобразователя напряжение-частота, сопротивление-частота, емкость-частота. Зависимости частоты от емкости конденсатора  $C$  для трех значений управляющего напряжения  $U_{упр}$  приведены на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что крутизна  $S(C)$  зависимости частоты от емкости определяется напряжением  $U_{упр}$  (в этом случае  $U_{упр}$  играет роль опорного напряжения). Максимальная крутизна преобразования наблюдается при положительном смещении опорного напряжения до  $S_{\max}(C) \approx 10$  кГц/пФ. С



увеличением емкости она падает до 1 кГц/пФ.

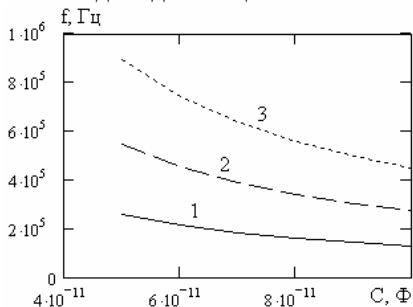


Рисунок 2 – Расчетные зависимости частоты преобразователя от емкости конденсатора  $C$ : 1 –  $U_{упр} = -0,1$  В; 2 –  $U_{упр} = 0$  В; 3 –  $U_{упр} = 0,1$  В

Зависимости частоты импульсов преобразователя информации от значения управляющего (входного) напряжения показаны на рис. 3.

Проанализирована работа ИГЗМ с широтно-импульсной модуляцией импульсов воздействия на объект исследования. Выбран диапазон мощностей, при котором сохраняется диагностическая ценность получаемой информации и обеспечивается наиболее экономичный режим работы измерительного генератора. Показано, что для обеспечения средней мощности воздействия на уровне номинальной  $P_{ном} = 0,3$  мВт диапазон возможных значений сопротивлений объекта исследования (ОИ) следует разбить на поддиапазоны, в пределах которых осуществляется автокоррекция мощности. Для ОИ с сопротивлением от 3 кОм до 30 кОм следует использовать импульсы с амплитудой 3 В, от 30 кОм до 300 кОм – 9,5 В, от 300 кОм до 3 МОм – 30 В.

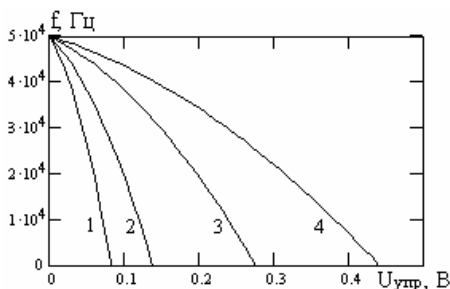


Рисунок 3 – Зависимости частоты импульсов преобразователя  $f$  от управляющего напряжения:

1 –  $R_1 = 10$  кОм, 2 –  $R_1 = 15$  кОм, 3 –  $R_1 = 30$  кОм, 4 –  $R_1 = 40$  кОм

Как известно, при работе любого электронного прибора или аппарата (в том числе и измерительного генератора заданной мощности) не исключается возможность возникновения в цепи нагрузки короткого замыкания (КЗ).

Поэтому был проведен анализ усилителя ИГЗМ в случае КЗ на его выходе. В ходе исследований установлено, что в измерительных генераторах заданной мощности с импульсными усилителями на КМОП-транзисторах нет необходимости введения специальных схем защиты с токоограничителем.

**Третья глава** посвящена разработке и исследованию емкостных формирователей импульсов постоянной энергии и мощности для ИГЗМ.

Проведен анализ формирователя импульсов экспоненциальной формы с накопительным конденсатором для ИГЗМ (рис. 4), принцип работы которого базируется на постоянстве энергии заряда конденсатора при постоянном значении заряжающего напряжения и зависимости времени заряда (разряда) от сопротивления объекта исследования.

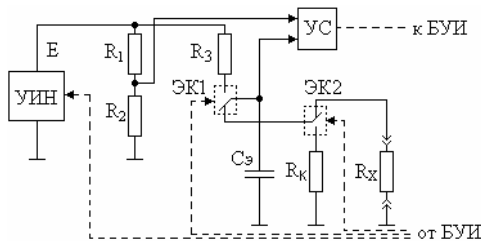


Рисунок 4 – Структурная схема формирователя импульсов с накопительным конденсатором

( $U_{ИИ}$  – управляемый источник напряжения;  $ЭК1$ ,  $ЭК2$  – электронные ключи;  $УС$  – устройство сравнения;  $БУИ$  – блок управления и индикации)

Показано, что длительность импульсов воздействия соответствует продолжительности разряда эталонного конденсатора  $C_э$  до уровня  $U_{R2} = E \frac{R_2}{R_2 + R_1} = \frac{E}{e}$ , где  $e = 2,71\dots$  Выбор опорного напряжения на уровне  $U_{R2} = 0,368E$  обусловлен следующими причинами:

1) На уровне  $E/e$  кривая зависимости  $u_C(t)$  имеет большую крутизну. Это обстоятельство позволяет компаратору точнее определить момент равенства напряжений  $u_C$  и  $U_{R2}$  при пороге чувствительности  $\Delta U$ .

2) Основная часть энергии импульса воздействия заключена в интервале времени от 0 до  $t_u = \tau_X = R_X C_э$ .

3) За время  $t_u = \tau_X$  в ОИ, независимо от величины его сопротивления, вносится постоянное количество электрической энергии

$$W = \int_0^{\tau_X} R_X \cdot i^2 dt = \frac{E^2}{R_X} \int_0^{\tau_X} \left( e^{-\frac{2t}{R_X C_э}} \right) dt = \frac{E^2 C_э}{2} (1 - e^{-2})$$

и рассеивается постоянная мощность в единицу времени

$$P_{Xcp} = k_1 \cdot W = \frac{k_1 E^2 C_{\mathcal{E}}}{2} (1 - e^{-2})$$

где  $k_1$  – количество импульсов воздействия за единицу времени. Энергия импульсов в этом случае составляет 86,5% от максимального возможного значения, равного энергии заряженного конденсатора.

В ходе исследований установлено, что энергия и мощность импульсов воздействия на объекты исследования не зависят от его сопротивления. Например, при  $E = 30$  В и  $C_{\mathcal{E}} = 300$  нФ, генератор заданной мощности в состоянии обеспечить энергию импульса воздействия на уровне 116 мкДж и среднюю мощность 0,35 мВт.

При измерении параметров ОИ выделено несколько «источников» погрешностей. Наиболее весомой является погрешность, вызванная порогом чувствительности компаратора  $\Delta U$ . Главным образом  $\Delta U$  влияет на процесс определения длительности импульсов формирователя, которые могут быть измерены с точностью

$$\Delta t = -\tau_x \cdot \ln \left( \frac{2E \cdot e^{-\frac{t_u}{\tau_x}} - \Delta U}{2E \cdot e^{-\frac{t_u}{\tau_x}} + \Delta U} \right).$$

Как показывают расчеты, увеличение  $\Delta U$  приводит к линейному возрастанию  $\Delta t / \tau_x$ . Крутизна зависимости  $\Delta t / \tau_x$  от  $\Delta U$  при этом составляет 0,03%/мВ. Для типичного значения  $\Delta U = 10$  мВ погрешность определения “временных ворот” (открытого состояния ЭКЗ) не превышает 0,2 %.

С учетом соотношения для  $\Delta t$  получено выражение, позволяющее оценить погрешность определения величины сопротивления ОИ:

$$\Delta R_X = \frac{\tau_x}{\tau_K} \cdot R_K \cdot \ln \left( \frac{2E \cdot e^{-\frac{t_0}{\tau_x}} - \Delta U}{2E \cdot e^{-\frac{t_0}{\tau_x}} + \Delta U} \right),$$

где  $\tau_K = R_K C_{\mathcal{E}}$ ,  $R_K$  – сопротивление калибровочного (эталонного) резистора.

Как показано на рис. 5,а абсолютная погрешность измерения  $R_X$  линейно зависит от  $\Delta U$  и с повышением сопротивления ОИ крутизна кривой  $\Delta R_X(\Delta U)$  увеличивается. Для типичного значения  $\Delta U = 0,01$  В погрешность  $\Delta R_X$  не более 200 Ом при  $R_X = 100$  кОм.

На рис. 5,б показано изменение абсолютной погрешности определения сопротивления исследуемого объекта от напряжения УИИ. При напряжении  $E = 15$  В величина погрешности  $\Delta R_X$  также не превышает 200 Ом.

В ходе исследований характеристик формирователя установлено, что путем выбора оптимального значения порога чувствительности компаратора можно добиться требуемого значения погрешности измерения  $R_X$ .

Из соотношения для  $\Delta R_X$  следует, что при нестабильности порога чувствительности  $\Delta U$  и управляемого источника напряжения  $E$  в 10% допол-

нительная погрешность измерений не превышает 0,03%.

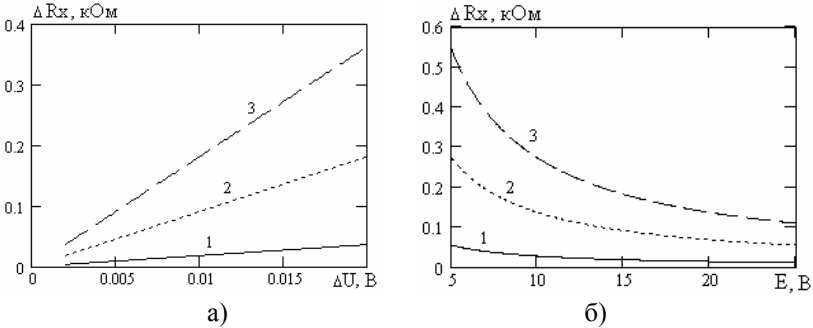


Рисунок 5 – Зависимости погрешностей от порога чувствительности компаратора (а) и от напряжения УИИ (б) при трех значениях сопротивления ОИ: 1 –  $R_x=10^4$  Ом; 2 –  $R_x=5 \cdot 10^4$  Ом; 3 –  $R_x=10^5$  Ом

В связи с тем, что разработанный формирователь может быть реализован как устройство с автономным питанием определенной практической интерес представляет оценка потребляемой им энергии. Поэтому был проведен расчет потерь энергии в схеме формирователя в режиме исследования ОИ. Для оценки потерь было получено следующее выражение:

$$W_{nom} = \int_0^{4\tau_3} \frac{E^2}{R_3} \left( \frac{e-1}{e} \cdot e^{-\frac{2t}{\tau_3}} \right)^2 dt,$$

где  $\tau_3 = R_3 C_3$ ,  $R_3$  – эталонное сопротивление в цепи заряда конденсатора  $C_3$ . В этом соотношении учтено, что зарядка эталонного конденсатора начинается не с нулевого напряжения, а с остаточного напряжения  $E/e$ . Верхний предел интеграла выбран с допущением того, что за время  $4\tau_3$  эталонный конденсатор  $C_3$  практически полностью заряжается ( $u_C = 0,988E$ ).

Проведен анализ формирователя двуполярных импульсов (рис. 6), воздействие которых на исследуемые объекты существенно уменьшает поляризационные явления. В этом формирователе обеспечивается также постоянство энергии импульсов за счет постоянства энергии заряженного конденсатора при неизменном значении «зарядного» напряжения, а постоянство мощности – заданным значением частоты ДГИ. Длительность импульсов формирователя (рис. 7) определяется как

$$t_u = C_3 \cdot (R_x + R_{вых}^1) \ln \frac{U_{вых ДУ}}{U_{пор}},$$

где  $U_{пор}$  – пороговое напряжение,  $R_{вых}^1$  – выходное сопротивление ДУ. Исследования показывали, что при изменении сопротивления ОИ в диапазоне от

$R_{Xmin}=10^4$  Ом до  $R_{Xmax}=10^6$  Ом длительность импульсов меняется в диапазоне  $t_{u min}=0,14$  мс до  $t_{u max}=14,06$  мс.

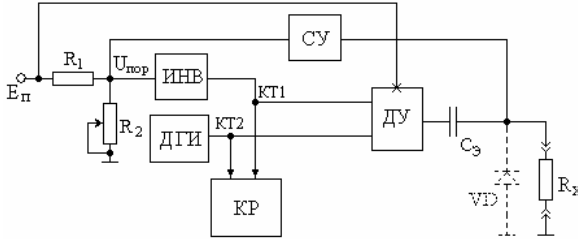


Рисунок 6 – Структурная схема формирователя двуполярных импульсов (ДГИ – дополнительный генератор импульсов; ДУ – дифференциальный усилитель; ИНВ – инвертор; КТ1, КТ2 – контрольные точки; КР – контроллер; СУ – согласующее устройство)

Длительность  $t_{ДГИ}$  и период  $T_{ДГИ}$  импульсов дополнительного генератора выбираются из условия  $t_{ДГИ} < t_{u min}$  и  $T_{ДГИ} > t_{u max} + 4\tau_{зар}$ , где  $t_{u min}$  и  $t_{u max}$  – минимальная и максимальная длительности импульсов воздействия на ОИ,  $\tau_{зар}$  – постоянная цепи заряда эталонного конденсатора  $C_3$ .

Количество электрической энергии, вносимой в исследуемый объект за время  $t_u$ , определяется как

$$W = \left( \frac{E_n}{R_X + R_{вых}^1} \right)^2 R_X \int_0^{t_u} \exp\left( -\frac{2t}{C_3(R_X + R_{вых}^1)} \right) dt.$$

Как показали расчеты, энергия, вносимая в ОИ, практически не зависит от величины сопротивления  $R_X$ .

Временные диаграммы, поясняющие работу формирователя импульсов с постоянной энергией и мощностью, представлены на рис. 7.

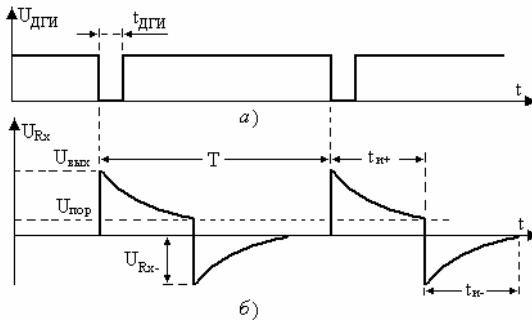


Рисунок 7 – Временные диаграммы, поясняющие работу формирователя импульсов с постоянной энергией и мощностью

В ходе анализа формирователя двуполярных импульсов установлено, что энергия импульса положительной полярности несколько больше энергии импульса отрицательной полярности. Для расчета средних мощностей импульсов формирователя были получены следующие соотношения:

$$P_{cp+} = \frac{k}{T} \int_0^{t_y} \left[ \frac{U_{вых ДУ}}{R_X + R_{вых}^1} \exp\left(-\frac{t}{C_Э (R_X + R_{вых}^1)}\right) \right]^2 R_X dt \text{ и}$$

$$P_{cp-} = \frac{k}{T} \int_0^{3\tau_{раз}} \left[ \frac{U_{вых ДУ} - U_{пор}}{R_X + R_{вых}^0} \exp\left(-\frac{t}{C_Э (R_X + R_{вых}^0)}\right) \right]^2 R_X dt$$

где  $\tau_{раз}$  – постоянная цепи разряда  $C_Э$ ,  $k$  – коэффициент, значение которого зависит от частоты поступающих с ДГИ импульсов. Верхний предел второго интеграла выбран с допущением того, что за время  $3\tau_{раз}$  конденсатор  $C_Э$  разрядится до напряжения, допустимого погрешностью задания мощности.

Выявлено, что мощность и энергия импульсов ИГЗМ, которые могут быть получены только при использовании интегральных компонентов электроники, равны 0,91 мВт и 0,55 мкДж соответственно.

Энергию и мощность импульсов формирователя можно повысить путем увеличения напряжения питания ДУ, емкости  $C_Э$ . Показано, что потери мощности в схеме формирователя двуполярных импульсов убывает по мере увеличения  $R_X$ . Наибольшие значения мощности потерь соответствуют диапазону изменения сопротивления ОИ от 10 кОм до 100 кОм.

При необходимости воздействие на ОИ может осуществляться импульсами только положительной полярности путем добавления в схему формирователя полупроводникового диода VD (рис. 6).

**В четвертой главе** приведены результаты экспериментальных исследований разработанных преобразователей.

Результаты экспериментальных исследований подтверждают основные выводы и положения, полученные при теоретическом анализе. Расчетные и экспериментальные кривые совпадают в пределах погрешности эксперимента (не более 5%).

Исследования многофункционального преобразователя информации ИГЗМ показали, что зависимость вносимой в исследуемый объект мощности от величины сопротивления ОИ имеет нелинейный характер и поэтому для поддержания мощности с заданной погрешностью целесообразно разбить диапазон возможных значений сопротивления ОИ на поддиапазоны. При этом, погрешность задания мощности в пределах поддиапазона сопротивлений (в зависимости от числа поддиапазонов) находится на уровне 1,5-5%. Нелинейность зависимости мощности от сопротивления ОИ в заданных пределах можно снизить путем увеличения сопротивления  $R_3$  (рис. 8).

Установлено, что изменение напряжения питания схемы преобразователя информации ИГЗМ в пределах 3÷15 В позволяет регулировать абсолют-

ные значения мгновенной и средней мощности, вводимой в исследуемый объект, на 20 дБ и более (рис. 9).

Показано, что при повышенных требованиях к точности измерения в преобразователь информации ИГЗМ необходимо ввести систему автокоррекции, которая позволяет регулированием выходного напряжения буферного усилителя преобразователя управлять величиной мощности импульсов, воздействующих на ОИ.

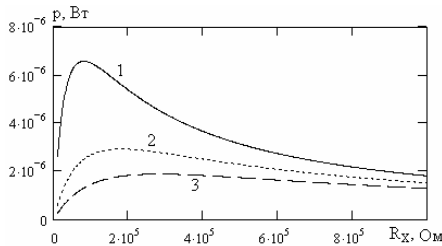


Рисунок 8 – Зависимость мгновенной мощности от  $R_X$  при разных значениях  $R_3$ : 1 – 80 кОм, 2 – 180 кОм, 3 – 280 кОм

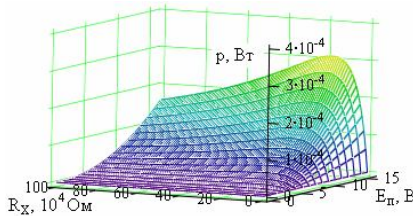


Рисунок 9 – Влияние на величину мгновенной мощности сопротивления  $R_X$  и напряжения питания  $E_n$

Отмечено, что многофункциональный преобразователь информации ИГЗМ с автокоррекцией мощности (а также и без автокоррекции) может быть рекомендован для реализации экономичного информационного преобразователя для активных биоуправляемых датчиков.

В ходе исследований формирователя импульсов ИГЗМ с накопительным конденсатором установлено, что изменения выходного напряжения  $U_{ИИ}$ , емкости  $C_3$  и количества импульсов в единицу времени позволяют управлять мощностью и энергией импульсов (рис. 10).

В ходе исследований формирователя двуполярных импульсов было выявлено, что изменения порогового напряжения  $U_{пор}$  в пределах от 0,1 В до 1,5 В и сопротивления ОИ в диапазоне от 10 кОм до 1 МОм не оказывают существенного влияния на среднюю мощность и энергию импульсов воздействия. Для повышения мощности и энергии импульсов рекомендуется увеличить напряжение питания схемы, либо использовать эталонный конденсатор с большей емкости.

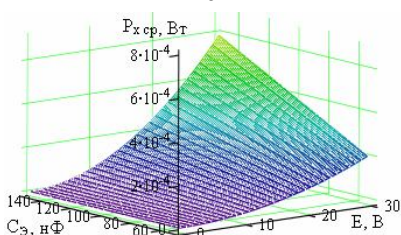


Рисунок 10 – Зависимость средней мощности импульсов от  $E$  и  $C_э$

В ходе теоретического анализа и экспериментальных исследований формирователя двуполярных импульсов ИГЗМ было выяснено, что при различных температурных режимах работы формирователя может происходить изменение емкости эталонного конденсатора. Уход номинала емкости  $C_э$  может произойти также и под влиянием временного фактора. Для компенсации погрешности и поддержания мощности и энергии импульсов на заданном уровне в схему формирователя предложено ввести систему автокоррекции мощности.

Отмечено, что в схеме формирователя двуполярных импульсов ИГЗМ со схемой автокоррекции мощности можно достичь погрешность задания мощности менее 0,5%.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В ходе теоретических и экспериментальных исследований, выполненных в диссертационной работе, получены следующие основные научные и практические результаты и выводы:

1. Сформулированы основные требования к измерительным генераторам заданной мощности, которые могут быть изменены и дополнены с учетом условий применения в различных областях науки и техники. Предложено проводить исследования ОИ путем воздействия на них импульсами с постоянной энергией и мощностью.

2. Синтезирован преобразователь информации ИГЗМ на элементах цифровой логики КМОП-структуры, отличающийся от существующих преобразователей большим числом функциональных возможностей и малой потребляемой мощностью. Установлено, что изменение напряжения питания схемы преобразователя информации ИГЗМ в пределах  $3 \div 15$  В позволяет регулировать абсолютные значения мгновенной и средней мощности, вводимой в исследуемый объект, на 20 дБ и более.

Проанализирована работа ИГЗМ с широтно-импульсной модуляцией импульсов воздействия, построенная на базе многофункционального преобразователя информации. Показано, что для исследования объектов с сопротивлением от 3 кОм до 30 кОм следует использовать импульсы с амплитудой 3 В, от 30 кОм до 300 кОм – 9,5 В, от 300 кОм до 3 МОм – 30 В.

3. Впервые при разработке формирователей импульсов с постоянной



энергией и мощностью был применен принцип постоянства энергии заряженного конденсатора при постоянстве напряжения источника питания.

Проведен анализ формирователя импульсов с накопительным конденсатором для ИГЗМ. Показано, что энергия и мощность импульсов воздействия при исследовании различных объектов не зависят от значения их сопротивления. В ходе теоретических и экспериментальных исследований формирователя установлено, что путем установки оптимального значения порога чувствительности компаратора можно добиться заданного значения погрешности измерения сопротивления ОИ.

4. В ходе анализа импульсных ИГЗМ на базе экономичных формирователей импульсов установлено, что изменение номинала эталонного конденсатора  $C_э$  приводит к увеличению погрешности измерения сопротивления ОИ. Для компенсации погрешности и поддержания мощности и энергии импульсов на заданном уровне предложено ввести в структуры ИГЗМ системы автокоррекции мощности.

5. Разработаны математические модели импульсных ИГЗМ со схемой стабилизации мощности, исследованы их основные характеристики, установлены факторы, влияющие на погрешность задания мощности. Проведены экспериментальные исследования и компьютерное моделирование предложенных схем ИГЗМ, которые подтвердили справедливость теоретических положений и допущений, принятых при разработке математических моделей.

6. В результате теоретических и экспериментальных исследований разработанных схем предложены рекомендации по повышению стабильности заданной мощности.

### **По теме диссертации опубликованы следующие работы**

#### **В издании из перечня ВАК**

1. Галиев А.Л., Орлов А.В. Широтно-импульсная модуляция в генераторах заданной электрической мощности //Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2007. –№4. – С. 32-33.

2. Орлов А.В., Галиев А.Л., Экономичный формирователь двуполярных импульсов постоянной мощности и энергии //Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2009. –№11. – С. 53-55.

3. Галиев А.Л., Юмагулов Н.И., Орлов А.В. Измерительный генератор с колебательным контуром и автокоррекцией мощности //Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2010. –№5. – С. 62-65.

#### **В других изданиях**

4. Галиев А.Л., Орлов А.В. Анализ работы ключевого усилителя при коротком замыкании в нагрузке //Современные проблемы радиоэлектроники: Сборник научных трудов Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и студентов. – Красноярск, КГТУ, 2004. – С. 620-623.

5. Галиев А.Л., Орлов А.В., Юмагулов Н.И. Анализ влияния параметров усилительных элементов на КПД электронных устройств с импульсной обработкой сигналов //Современные проблемы физики и математики: Труды Всероссийской научной конференции. – Уфа: Гилем, 2004. – С. 196-199.

6. Галиев А.Л., Орлов А.В., Юмагулов Н.И. Аналитическая модель униполярного транзистора при низких напряжениях питания //Современные проблемы физики и математики: Труды Всероссийской научной конференции. – Уфа: Гилем, 2004. – С. 193-195.

7. Орлов А.В., Галиев А.Л. Об одном способе обеспечения заданной мощности в измерительных генераторах //Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. /Под ред.: А.И. Громыко, А.В. Сарафонов. – М.: Радио и связь, 2006. – С. 228-231 (629 с.).

8. Галиев А.Л., Орлов А.В. Об одном способе стабилизации мощности измерительного генератора //Труды Стерлитамакского филиала академии наук РБ. Серия “Физико-математические и технические науки”. Выпуск 4. – Уфа: Гилем, 2006. – С.128-131 (184 с).

9. Орлов А.В. Формирование заданной энергии импульсов в измерительных генераторах //Молодежь. Прогресс. Наука: Сб. материалов III Межвуз. науч.-практ. конф. молодых ученых, Республика Башкортостан, г. Стерлитамак, 7-12 апреля 2008 г. / Отв. ред. А.Л. Галиев; зам. отв. ред. А.В. Малолеткова. – Стерлитамак: Стерлитамак. гос. пед. академия, 2008. – С. 219-220 (293 с.).

10. Орлов А.В., Галиев А.Л. Импульсный генератор для исследования биологических объектов //Вузовская наука: инновационные подходы и разработки: Сборник научных трудов профессорско-преподавательского состава Стерлитамакской государственной педагогической академии им. Зайнаб Бишевой / Под общ. ред. А.Л. Галиева; отв. ред. Л.М. Линецкая. – Стерлитамак: Стерлитамак. гос. пед. академия, 2008. – С. 30-32 (160 с.).

11. Галиев А.Л., Орлов А.В. Экономичный измеритель параметров тепловых объектов //Электроника, автоматика и измерительные системы: Межвузовский научный сборник. – Уфа: УГАТУ, 2009. – С. 71-74 (210с.).

12. Галиев А.Л., Орлов А.В. Об одном способе реализации информационного преобразователя для биоуправляемых датчиков //Роль классических университетов в формировании инновационной среды регионов: Сборник научных трудов МНПК. –Уфа, 2009. Том II, Часть I. – С. 123-126.

ОРЛОВ Алексей Вениаминович

ИМПУЛЬСНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ  
С АВТОКОРРЕКЦИЕЙ МОЩНОСТИ  
(развитие теории, исследования и разработка)

Специальность 05.13.05 – Элементы и устройства  
вычислительной техники и систем управления

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать \_\_\_\_\_ Формат 60x84 <sup>1/16</sup>.  
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Таймс.  
Усл. печ. л. 1,0. Усл. кр.-отт. Уч.-изд. л. 0,9.  
Тираж 100 экз. Заказ № \_\_\_\_

Отпечатано в полиграфическом участке Стерлитамакской государственной  
педагогической академии им. Зайнаб Бишевой:  
453103, Стерлитамак, пр. Ленина, 49.