

На правах рукописи



Южанин Максим Владимирович

**УСТРОЙСТВА ИЗМЕРЕНИЯ МОДУЛЯ КОМПЛЕКСНЫХ
СОПРОТИВЛЕНИЙ ДВУХПОЛЮСНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ С
ПРИМЕНЕНИЕМ СИНХРОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ РАДИОСИГНАЛОВ**

Специальность 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства
телевидения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» на кафедре радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга

Научный руководитель: Туев Василий Иванович,
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: Майстренко Василий Андреевич,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Средства
связи и информационная
безопасность» Омского
государственного технического
университета» (ОмГТУ)

Разинкин Владимир Павлович,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Теоретических основ
радиотехники» Новосибирского
государственного технического
университета

Ведущая организация: АО «Институт Микроволновых
Интегральных Систем» (АО «Микро-
ВИС»), г. Москва

Защита диссертации состоится «03» декабря 2019г. в 09 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.268.01, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР) по адресу: 634050, г. Томск, ул. Ленина, 40.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте <https://postgraduate.tusur.ru/urls/v4vofy8l> и в библиотеке ТУСУР по адресу: 634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 146.
Автореферат разослан «__» октября 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.268.01
д.ф.-м.н., профессор



Мандель А.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Измерения модулей комплексных сопротивлений двухполюсных электрических цепей необходимы при проведении радиотехнических исследований, сопутствуют решению задач проектирования и эксплуатации технологических датчиков, элементов устройств систем связи и управления и т. д. Проведение измерений модулей комплексных сопротивлений двухполюсных электрических цепей систем связи приходится выполнять в условиях сложной электромагнитной обстановки. В результате определение полезного сигнала происходит при наличии помех, а это обстоятельство накладывает требование учета их влияния на метрологические характеристики измерительного оборудования.

Синхронное детектирование радиосигналов, предложенное в трудах советского исследователя Евгения Григорьевича Момота и развитое в трудах Павлова Б.А., Полякова В.Т., Руднева А.Н., находит применение при построении радиоприемных трактов аппаратуры связи, в измерительной, телевизионной технике и т.д. Синхронное детектирование обладает повышенной помехоустойчивостью, что позволяет повысить точность измерения модулей комплексных сопротивлений двухполюсных электрических цепей.

Степень разработанности

Помехоустойчивость является важным фактором при проектировании измерительных устройств, поскольку при измерениях в условиях реальной электромагнитной обстановки необходимо учитывать дополнительную погрешность измерения.

Широкое использование полупроводниковых приборов работающих на принципе полевого управления движением носителей заряда, – полевых транзисторах (ПТ) – в задачах моделирования и проектирования измерительной техники обусловлено получением решений с улучшенной помехоустойчивостью.

Синхронное детектирование сигналов достигается использованием комбинационных компонент нелинейного взаимодействия входных сигналов, поэтому синхронные детекторы относятся к классу инерционных нелинейных устройств. Для расчета комбинационных компонент используются методы анализа нелинейных электрических цепей.

Для анализа составляющих выходного тока ПТ с двумя управляющими электродами при синхронных воздействиях использован метод, предложенный в работах Н. Винера и развитый Б.М. Богдановича, Ю.Л. Хотунцева, Е.А. Волкова, В.И. Туева, С.В. Мелихова, В.Д. Дмитриева, А.Г. Жаркого, А.И. Силютина, В.Р. Снурницина, Буссганга (J.Bussgang), Нарайанана

(S. Naraynan), Эрмана (L. Ehrman), Бедрояна (E. Bedrosian), Грейама (J. Graham) и других учёных, работавших с методом функциональных рядов Вольтерра (ФРВ).

Цель работы

Распространение метода нелинейных токов на синхронные детекторы радиосигналов на полевых транзисторах и их использование в новых устройствах измерения модуля комплексного сопротивления двухполюсных электрических цепей.

Задачи исследований

1. Получение выражений для расчета выходного тока полевых транзисторов при синхронных воздействиях.

2. Разработка универсальной функции для аппроксимации вольт-амперных характеристик (ВАХ) во всей области допустимых напряжений на электродах полевых триодов и тетродов.

3. Определение зависимости погрешности расчета напряжения сигнала на выходе последовательного диодного амплитудного детектора при воздействии двух гармонических колебаний сигнала и помехи от соотношения амплитуд этих колебаний.

4. Создание и внедрение новых способов, устройств и систем для измерения модуля комплексного сопротивления двухполюсных электрических цепей и параметров химических источников тока.

Научная новизна

1. Распространен метод нелинейных токов на устройства синхронного детектирования радиосигналов. Получены новые выражения для расчёта выходного тока полевого транзистора с двумя управляющими электродами при синхронных воздействиях.

2. Найдена зависимость погрешности расчета напряжения сигнала на выходе последовательного диодного амплитудного детектора при воздействии двух гармонических колебаний сигнала и помехи от соотношения амплитуд этих колебаний.

3. Разработана методика моделирования вольт-амперных характеристик полевых транзисторов на основе экспоненциальной функции.

Теоретическая значимость

Теоретическая значимость работы определяется распространением метода нелинейных токов на синхронные детекторы радиосигналов, которое достигнуто получением новых выражений для расчёта выходного тока полевых транзисторов при синхронных воздействиях.

Практическое значение работы

1. Предложена методика определения параметров статической модели полупроводниковых приборов – полевых транзисторов, биполярных транзисторов с изолированным затвором (*IGBT*), выпрямительных диодов и светодиодов.

2. Разработано новое устройство для определения составляющих внутреннего сопротивления химических источников тока.

3. Разработано новое техническое решение устройства измерения модулей комплексных сопротивлений двухполюсных электрических цепей с расширенными функциональными возможностями и увеличенным диапазоном измеряемых значений.

4. Разработаны новые технические решения: аппаратно-программного комплекса для тестирования и заряда аккумуляторных батарей, входящего в состав системы гарантированного электропитания; устройства определения параметров химических источников тока; устройства питания для светодиодного источника оптического излучения.

На четыре новых устройства получены: патент на изобретение №2449302 «Способ определения составляющих внутреннего сопротивления химических источников тока», патенты на полезные модели №130088 «Система гарантированного электропитания с аппаратно-программным комплексом для тестирования и заряда аккумуляторных батарей», №183327 «Устройство определения параметров химических источников тока» и №108885 «Источник оптического излучения».

Под руководством и при непосредственном участии автора создан и внедрен аппаратно-программный комплекс удалённого технического обслуживания аккумуляторных батарей (устройство для измерения полного внутреннего сопротивления химических источников тока). Устройство внедрено на объекте связи филиала АО «Связьтранснефть» - «Сибирское ПТУС».

Результаты диссертационной работы использованы при расчёте электромагнитной совместимости в части кондуктивных радиопомех в диапазоне частот 0,15-30 МГц экспериментальных образцов светодиодных ламп в Научно-исследовательском институте светодиодных технологий ТУСУР при выполнении работ по целевой программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014 – 2020 годы» в рамках проекта «Разработка прототипов передовых технологических решений роботизированного интеллектуального производства электронной компонентной базы и энергоэффективных световых устройств», уникальный идентификатор работы (проекта) RFMEFI57717X0266.

Результаты диссертационной работы (результаты математического моделирования вольт-амперных характеристик светоизлучающих диодов на основе экспоненциальной функции) используются в учебном процессе в

Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники при выполнении практических работ и в самостоятельной работе студентов по дисциплине «Преддипломный курс» для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств», профиль «Технология электронных средств».

Документы о внедрении и использовании результатов диссертационной работы приведен в приложении А к диссертационной работе.

Используемые методы исследований

Для решения поставленных задач использованы методы теории линейных и нелинейных электрических цепей, матричной алгебры, функциональных разложений рядов Вольтерра аналитических функций многих переменных. Проверка полученных теоретических результатов выполнялась на основе экспериментальных исследований.

Положения, выносимые на защиту

1. Расчетные соотношения для определения составляющих, образованных не только частными, но и смешанными проводимостями из разложения функции, описывающей семейство ВАХ, в кратный ряд Тейлора, позволяют рассчитывать постоянную составляющую на выходе синхронных детекторов.

2. Предложенная функция позволяет аппроксимировать всю совокупность вольт-амперных характеристик полупроводниковых приборов в диапазоне допустимых значений напряжений на затворе (затворах) и стоке, включая инверсную область характеристик транзистора, с погрешностью аппроксимации, не превышающей 15%.

3. Применение синхронных детекторов в устройствах измерения сопротивлений химических источников тока позволяет увеличить точность измерения и расширить функциональные возможности устройства: кроме определения омического сопротивления электролита, определять активное сопротивление электрохимических реакций и электрическую емкость двойных электрических слоев, имеющих место на границах разделов электродов с электролитом.

Степень достоверности и апробация результатов

Основные разделы и результаты работы докладывались и обсуждались на международных научно-технических конференциях «Научная сессия ТУСУР» (Томск, 2018, 2011, 2010, 2009, 2008), «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск, 2008), «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (Санкт-Петербург, 2008), «Электронные средства и системы управления» (Томск, 2007), «Современные проблемы радиоэлектроники» (Красноярск, 2007), «Микроэлектроника и

информатика» (Москва, 2007), «Проблемы информационной безопасности государства, общества и личности» (Томск, 2007).

Результаты диссертационной работы опубликованы в 23 работах, из которых 5 статей опубликованы в рецензируемых журналах из перечня ВАК, одна статья опубликована в иностранном научном издании, 4 – патенты на изобретение и полезные модели, 13 – статьи в сборниках трудов научно-технических конференций. Работы, опубликованные в соавторстве, выполнены при равном творческом участии соавторов.

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, двух приложений, списка использованных источников информации, включающего 167 наименований, содержит 117 страниц текста, 41 рисунок и 5 таблиц.

Основное содержание работы

Введение

Во введении обоснована актуальность темы, определены цель и задачи диссертационной работы, показаны научная новизна и практическое значение работы, сформулированы научные положения, выносимые на защиту, а также отражены сведения об апробации работы, публикациях и структуре диссертации.

Первый раздел

В первом разделе раскрыто понятие синхронного детектирования, классифицированы помехи, которые могут действовать на входе синхронного детектора. Выполнен аналитический обзор по методам анализа и моделирования нелинейных элементов в устройствах радио- и электротехники, методам и устройствам измерения составляющих комплексного сопротивления двухполюсных электрических цепей и, в частности, химических источников тока (ХИТ).

Дано описание методов анализа и моделирования нелинейных устройств. Перечислены требования, предъявляемые к моделям, с помощью которых описываются активные нелинейные элементы. Подчеркнута взаимная противоречивость этих требований и показано, что применяемые модели должны компромиссно удовлетворять всем указанным требованиям. Приведены методы анализа нелинейных электрических цепей с активными элементами с раскрытием их характерных особенностей.

Для описания приёмно-усилительных трактов с несущественной нелинейностью применен математический аппарат функциональных рядов Вольтерра. Применение метода ФРВ к анализу нелинейных цепей с ограниченной «памятью», поведение которых не зависит от начальных условий, позволяет найти явную связь отклика $y(t)$ и входного воздействия $x(t)$ в форме ряда Вольтерра:

$$\begin{aligned}
y(t) = & \int_{-\infty}^{\infty} h_1(\tau)x(t - \tau)dt + \\
& + \iint_{-\infty}^{\infty} h_2(\tau_1, \tau_2)x(t - \tau_1)x(t - \tau_2)d\tau_1d\tau_2 + \dots \\
& \dots + \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} h_n(\tau_1, \dots, \tau_n) \prod_{i=1}^n x(t - \tau_i) d\tau_i,
\end{aligned} \tag{1}$$

где $h_n(\tau_1, \dots, \tau_n)$ – ядро Вольтерра n -го порядка, которое является нелинейной импульсной реакцией n -го порядка.

Ряд (1) применим к устойчивым, однозначным, физически реализуемым цепям, для которых выполняются условия:

- 1) $\int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} h_n(\tau_1, \dots, \tau_n) d\tau_1 \dots d\tau_n < \infty$;
- 2) $h_n(\tau_1, \dots, \tau_n) = 0$ для $\tau_i < 0, i = 1, \dots, n$;
- 3) $\lim_{\tau_i \rightarrow \infty} h_n(\tau_1, \dots, \tau_n) = 0, i = 1, \dots, n$.

Непосредственное применение ряда (1) для моделирования нелинейных электрических цепей во временной области сдерживается сложностью определения нелинейных импульсных реакций $h_n(\tau_1, \dots, \tau_n)$ ядер Вольтерра. В связи с этим более широкое использование в моделировании получили методы определения ядер Вольтерра в частотной области в виде нелинейных передаточных функций (НПФ) – изображений Фурье ядер n -го порядка

$$\begin{aligned}
& \dot{H}_n(\omega_1, \dots, \omega_n) = \\
& = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} h_n(\tau_1, \dots, \tau_n) \cdot e^{-j(\omega_1\tau_1 + \dots + \omega_n\tau_n)} d\tau_1 \dots d\tau_n.
\end{aligned} \tag{2}$$

НПФ неизменны к любому виду входного воздействия, с их использованием рассчитываются широко распространенные на практике различные характеристики нелинейных искажений, в частности коэффициент гармоник, перекрестная модуляция, интермодуляция, сжатие, блокирование и т.д.

Указанный математический аппарат применяется при моделировании нелинейных элементов схем на основе метода нелинейных токов (МНТ). В сущности МНТ представляет собой итерационный процесс, при котором реакция цепи интересующего порядка определяется на основе реакций более низких порядков. Протекающий через нелинейный элемент ток рассматривается на следующем этапе расчета в качестве возбуждающего воздействия для линейной ассоциированной схемы, включающей помимо линейных элементов анализируемой цепи первые коэффициенты разложения зависимостей нелинейных элементов в степенной ряд. Метод применим для цепей, содержащих помимо линейных нелинейные двухполюсные элементы и

зависимые нелинейности. Каждый нелинейный элемент описывается рядом Тейлора.

Но, МНТ разработанный для расчёта одноходовых нелинейных устройств не позволяет рассчитывать синхронные детекторы (устройства с двумя входами). Необходимо получение расчётных выражений для расчёта выходного тока ПТ при синхронных воздействиях на двух управляющих электродах.

Наибольшее распространение в радиотехническом приборостроении получили полупроводниковые приборы с токовым (биполярные) и с полевым (полевые) управлением. Биполярные транзисторы хорошо изучены, их нелинейный свойства описаны и смоделированы. Более перспективными для использования в синхронных преобразователях являются полевые транзисторы, среди которых имеются полевые тетроды (ПТ с двумя затворами). В настоящей работе осуществляется исследование устройств именно на полевых транзисторах.

Дан обзор по существующим способам аппроксимации ВАХ ПТ. Зависимость тока стока от напряжения на электродах ПТ описывается различными математическими выражениями. Известные выражения, описанные в научной литературе, разработаны применительно к отдельным группам ПТ (триодам и тетродам) и различаются для приборов одной группы по структуре и используемым математическими функциям в зависимости от структуры затворов ПТ ($p-n$ -переход, барьер Шоттки, МДП). В связи с этим, необходима разработка универсальной функции для аппроксимации ВАХ во всей области допустимых напряжений на электродах полевых триодов и тетродов.

Проанализированы методы определения полных сопротивлений двухполюсных электрических цепей. При использовании метода амперметра-вольтметра для определения модуля комплексного сопротивления измеряемого двухполюсника измерительная цепь запитана от источника переменного напряжения. При этом сигналы постоянного тока, пропорциональные значениям переменного тока и переменного напряжения получают, как правило, используя диодное детектирование. Необходимо определение зависимости погрешности, вносимой близкорасположенной по частоте помехой, при детектировании сигнала амплитудным детектором от соотношения амплитуд сигнала и помехи.

Измерение сопротивлений таких двухполюсных электрических цепей как ХИТ необходимо для оценки их состояния. Известные методы позволяют определять только модуль полного сопротивления ХИТ и внутреннее сопротивление постоянному току. В связи с этим необходимо выполнить разработку метода, с помощью которого будет реализована возможность измерения модуля комплексных сопротивлений двухполюсных электрических цепей и параметров ХИТ, включая значение реактивного параметра.

Второй раздел

Во втором разделе получены новые соотношения для определения выходного тока активных элементов с двумя управляющими электродами при синхронных воздействиях.

Обобщенная схема синхронного преобразователя приведена на рисунке 1.

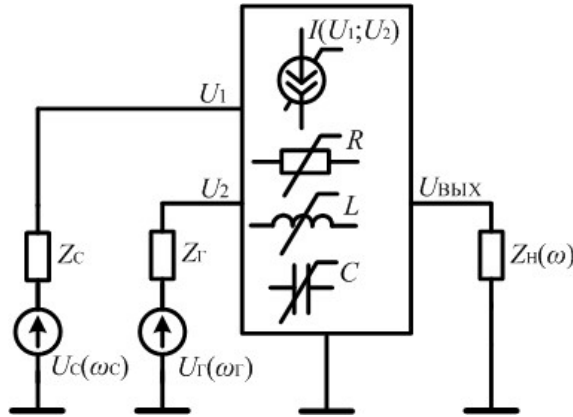


Рисунок 1 – Схема синхронного преобразователя

К входам устройства подключены источники сигнала и гетеродина:

$$\left. \begin{aligned} U_C(t) &= U_C \cdot \cos(\omega_C t) \\ U_G(t) &= U_G \cdot \cos(\omega_G t + \varphi) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Синхронное преобразование выполняется при равенстве частот

$$\omega_C = \omega_G = \omega_0. \quad (4)$$

Входные сигналы, представленные в символической форме:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_C &= U_C \\ \dot{U}_G &= U_G \cdot e^{j\varphi} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

К выходу преобразователя подсоединена нагрузка с сопротивлением $Z_H(\omega)$ на частоте ω . Нелинейный четырехполюсник содержит источник тока, зависящий от напряжений на обоих управляющих входах, и произвольное количество линейных и нелинейных RLC – элементов.

Расчет тока зависимого источника в соответствии с МНТ проводится в виде

$$i = \sum_{n=1}^N i_n, \quad (6)$$

где N – наивысший порядок учитываемой нелинейности;

i_n – нелинейный ток n -го порядка.

На основании обобщенных формул для расчета нелинейных эквивалентных источников тока многоэлектродных активных элементов составляющие тока первых двух порядков ($N=2$), представляющие практический интерес при расчете синхронных детекторов, можно представить в виде

$$i_1(\omega_1) = \sum_{k=1}^2 g_k^{(1)} \cdot U_k^{(1)}(\omega_1), \quad (7)$$

$$i_2(\omega_1, \omega_2) = \sum_{k=1}^3 i_{2k}(\omega_1, \omega_2), \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} i_{2_1}(\omega_1, \omega_2) &= g_1^{(2)} \cdot U_1^{(1)}(\omega_1) \cdot U_1^{(1)}(\omega_2) \\ i_{2_2}(\omega_1, \omega_2) &= g_2^{(2)} \cdot U_2^{(1)}(\omega_1) \cdot U_2^{(1)}(\omega_2) \\ i_{2_3}(\omega_1, \omega_2) &= g_{1,2}^{(1+1)} \cdot \left\{ U_1^{(1)}(\omega_1) \cdot U_2^{(1)}(\omega_2) \right\}_{Sym} \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

где символом $\{ \}_{Sym}$ обозначена операция симметризации. Частные и смешанные проводимости $g^{(\cdot)}$ в (7)-(9) определяются из разложения аналитической зависимости тока источника в кратный ряд Тейлора в окрестности рабочей точки, определяемой напряжениями смещения U_{10}, U_{20}

$$g_{1,2}^{(m_1+m_2)} = \frac{1}{m_1! \cdot m_2!} \cdot \frac{\partial^{m_1+m_2} I(U_{10}, U_{20})}{\partial U_1^{m_1} \partial U_2^{m_2}}. \quad (10)$$

Нелинейные токи (7)-(9) с частными и смешанными проводимостями (10) двухполюсных элементов используются для определения НПФ вида $W_n^{k,\dots,l}[\omega_1, \dots, \omega_n]$ (k, \dots, l – номера входов), дающих явную связь отклика и воздействий на конкретных входах. Для случая использования синхронного преобразователя в качестве детектора полезный продукт – постоянное напряжение $U_{ВЫХ}(0)$ определяется выражением

$$U_{ВЫХ}(0) = Re \left(W_2^{1,2}[\omega_C, -\omega_\Gamma] \cdot U_C \cdot U_\Gamma \cdot e^{j\varphi} + \frac{1}{2} \cdot \left(W_2^{1,1}[\omega_C, -\omega_C] \cdot U_C^2 + W_2^{2,2}[\omega_\Gamma, -\omega_\Gamma] \cdot U_\Gamma^2 \right) \right). \quad (11)$$

Таким образом, полученные расчетные соотношения учитывают как составляющие тока, имеющие нелинейный характер образования за счет частных проводимостей нелинейного элемента так и составляющие тока, имеющие нелинейно-параметрический характер образования за счет смешанных проводимостей при взаимодействии сигналов. Также учтены как составляющие, имеющие «прямой» характер образования, т.е. образованные взаимодействием линейных напряжений, так и «косвенные» составляющие, образованные взаимодействием линейных напряжений и напряжений более высоких порядков. Полученные расчетные выражения позволяют расширить возможности МНТ и применить его для расчета синхронных детекторов радиосигналов на ПТ с двумя управляющими электродами.

Третий раздел

В третьем разделе предложен метод моделирования ВАХ ПТ на основе экспоненциальной функции, рассмотрено применение предложенных во

втором разделе расчетных соотношений выходного тока полупроводниковых приборов и предложенной аппроксимирующей функции для расчета нелинейных передаточных функций и анализа спектра выходного тока синхронного детектора.

В первой части третьего раздела предложена универсальная экспоненциальная функция, аппроксимирующая семейства ВАХ, во всех областях допустимых напряжений на электродах при прямом и инверсном включении ПТ, позволяющая строить физические модели многоэлектродных активных элементов. Для аппроксимации ВАХ ПТ использовано представление известного разложения функции гиперболического тангенса в виде отношения суммы и разности экспонент. В числителе добавлен функционально зависимый коэффициент при первом слагаемом и, в общем случае, не единичный по значению. Полученный при этом функционал, пригодный для описания зависимости тока стока I_C от напряжений на стоке U_C , первом затворе U_{31} полевых триодов и втором затворе U_{32} полевых тетродов относительно истока имеет вид:

$$I_C(U_C, U_{31}, U_{32}) = \frac{A_1(U_{31}, U_{32}) \cdot e^{B \cdot U'_C(U_{31}, U_{32})} + A_2 \cdot e^{-B \cdot U'_C(U_{31}, U_{32})}}{e^{B \cdot U'_C(U_{31}, U_{32})} - e^{-B \cdot U'_C(U_{31}, U_{32})}} \cdot (U_{32} - D \cdot U_{02}), \quad (12)$$

где

$$A_1(U_{31}, U_{32}) = \frac{A_3 \cdot e^{E \cdot U'_{31}(U_{31}, U_{32})}}{e^{E \cdot U'_{31}} - e^{-E \cdot U'_{31}}} \cdot (U_{32} - G \cdot U_{02}); \quad (13)$$

$$U'_{31} = U_{31} - F \cdot U_{01}; \quad (14)$$

$$U'_C(U_{31}, U_{32}) = U_C - \frac{\ln(A_1(U_{31}, U_{32})) - \ln(A_2)}{2 \cdot B \cdot U_{31}} \cdot U_{01}; \quad (15)$$

A_2, A_3, B, D, E, F, G – числовые коэффициенты;

U_{01}, U_{02} – напряжения отсечки соответственно по первому и второму затворам.

Функция $A_1(U_{31}, U_{32})$ в (12) описывает зависимость тока стока от напряжения на затворе U_{31} полевых триодов и совместно с сомножителями $(U_{32} - G \cdot U_{02})$ в (12) и $(U_{32} - G \cdot U_{02})$ (13) – от напряжений на первом U_{31} и втором U_{32} затворах полевых тетродов относительно истока. При аппроксимации ВАХ полевых триодов эти сомножители исключаются.

Численные значения коэффициентов A_2, A_3, B, D, E, F, G определяются по экспериментально измеренным ВАХ. В таблице 1 приведены численные значения коэффициентов аппроксимации, найденные по методике, подробно описанной в диссертационной работе, и напряжений отсечки для некоторых типов ПТ.

Таблица 1 – Коэффициенты выражения (12) для различных типов ПТ

Тип	A_2	A_3	B	D	E	F	G	Напряжение
-----	-------	-------	-----	-----	-----	-----	-----	------------

ПТ								отсечки, В
АП326А	0,001	0,103	0,8	–	0,75	0,25	–	$U_{01} = -4$
АП604	0,2	0,13	0,9	–	1	0,51	–	$U_{01} = -4$
АП328	1	0,011	0,7	0,476	1,2	0,55	1	$U_{01} = -2,5$ $U_{02} = -2,1$
2N7002P	1	0,97	0,3	–	0,7	2	–	$U_{01} = -2,4$
2П302Б/ИУ	1	0,015	0,5	–	1	0,29	–	$U_{01} = -2,85$

Результаты аппроксимации экспериментально измеренной передаточной ВАХ для полевого триода 2N7002P приведены на рисунке 2а), на рисунке 2 б) выходных характеристик указанного ПТ.

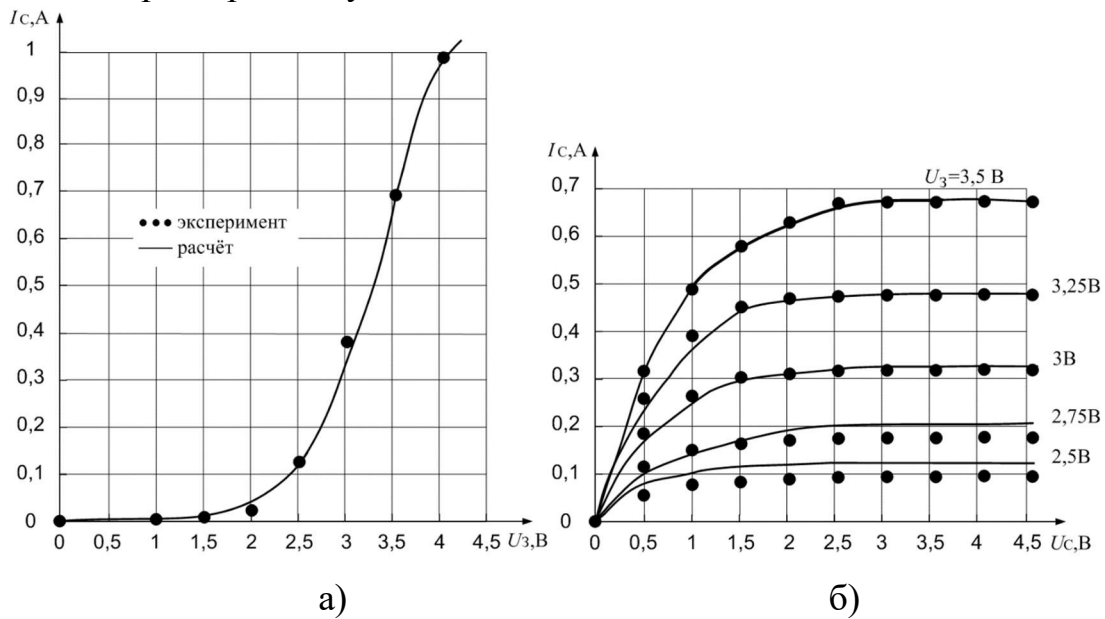


Рисунок 2 – Вольт-амперные характеристики полевого триода 2N7002P

Результаты аппроксимации экспериментально измеренной ВАХ для полевого триода 2П302Б/ИУ приведены на рисунке 3.

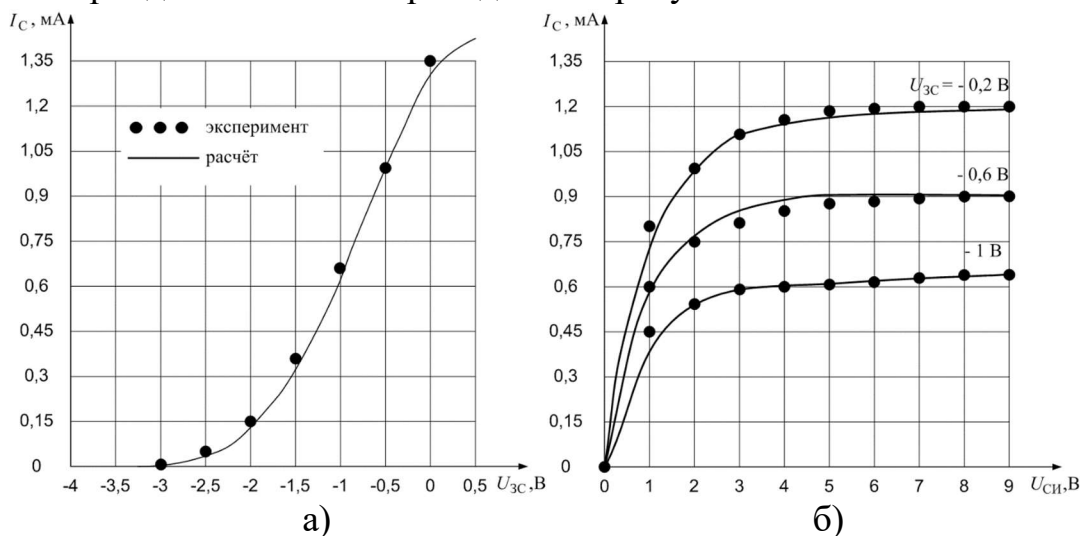


Рисунок 3 – Вольт-амперные характеристики полевого триода 2П302Б/ИУ

Предложенное выражение (12) позволяет аппроксимировать вольт-амперные характеристики с погрешностью не более 15% и разрабатывать формализованные нелинейные модели полевых триодов и тетродов. Дополнительным преимуществом предложенной функции является ее универсальность, которая доказана ее применением для моделирования биполярных транзисторов с изолированным затвором (*IGBT*) и светоизлучающих диодов.

Во второй части третьего раздела проведен расчет значений нелинейных токов зависимого источника по формулам (7)-(9) с использованием экспоненциальной аппроксимирующей функции (12)-(15).

Зависимость составляющих нелинейного тока второго порядка зависимого источника, рассчитанных в соответствии с формулами (7)-(9), в зависимости от режима работы ПТ приведены на рисунке 4.

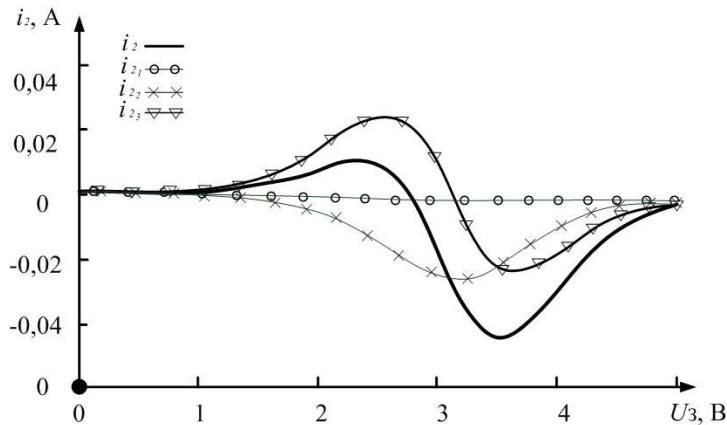


Рисунок 4 – Составляющие нелинейного тока второго порядка

Основной вклад в результирующий ток второго порядка в схеме синхронного детектора на ПТ вносит составляющая i_{23} , образованная за счет смешанной проводимости $g_{1,2}^{(1+1)}$ при нелинейно-параметрическом взаимодействии напряжений первого порядка на затворе и стоке ПТ. Этот результат свидетельствует о существенном вкладе составляющих, образованных в результате взаимодействия напряжений с различных управляющих электродов, и подтверждает необходимость учета составляющих нелинейных токов образованных за счет смешанных проводимостей при разложении функции, аппроксимирующей ВАХ нелинейного элемента, в кратный ряд Тейлора.

Сравнительные расчетная по (11) и экспериментальная зависимости постоянного выходного напряжения пассивного синхронного преобразователя на маломощном МДП ПТ типа *2N7002P*, эквивалентная схема которого приведена на рисунке 5, при амплитуде колебания гетеродина 4 В представлены на рисунке 6.

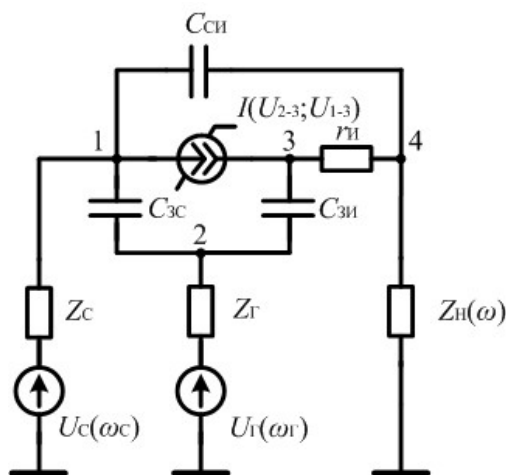


Рисунок 5 – Эквивалентная схема синхронного детектора на МДП ПТ $2N7002P$

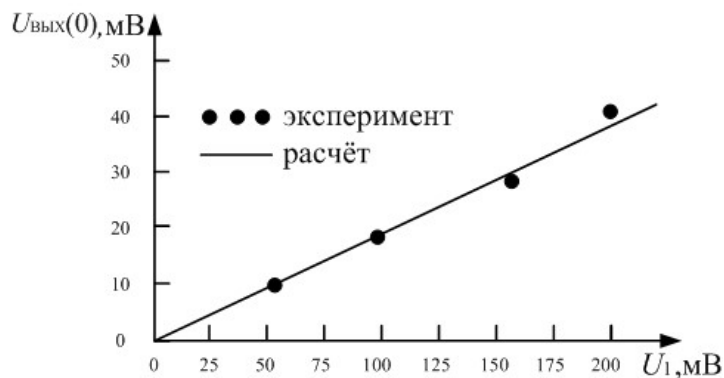


Рисунок 6 – Зависимость выходного напряжения синхронного преобразователя от величины входного сигнала

Четвертый раздел

В первой части четвертого раздела выполнено описание нового способа измерения модуля комплексных сопротивлений двухполюсных электрических цепей и новых технических решений устройств для измерения значений параметров ХИТ.

Структурная схема измерительного устройства, в котором реализован новый способ измерения модуля комплексного сопротивления двухполюсников с учетом действия помехи, приведена на рисунке 7.

Цепь из последовательно соединенных гасящего резистора $R_г$, измеряемого двухполюсника Z_x и образцового резистора $R_{обр}$ запитана от генератора, представленного источником синусоидального сигнала $E_{ГЕН}$ с внутренним сопротивлением $R_{ГЕН}$ и частотой $\omega_{ГЕН}$. Помеха моделируется источником синусоидального колебания амплитудой $E_{ПОМ}$ и частотой $\omega_{ПОМ} \neq k \cdot \omega_{ГЕН}$ ($k = 1, 2, \dots$).

Сигналы $U_1(t)$ и $U_2(t)$ поданы на входы двух детекторов Д1 и Д2, нагруженных на фильтры нижних частот ФНЧ1 и ФНЧ2 соответственно.

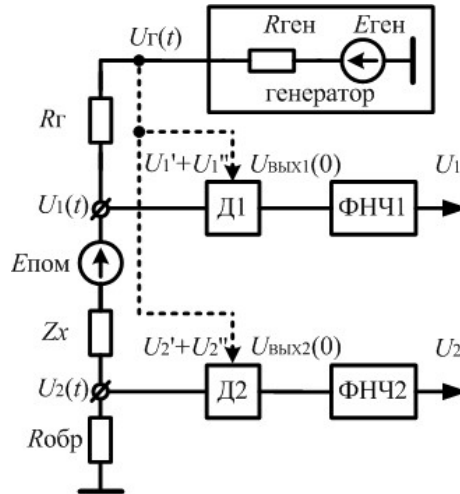


Рисунок 7 – Структурная схема измерительного устройства

Напряжения с выходов фильтров используются для расчета измеряемого сопротивления

$$Z_{\text{РАСЧ.}} = \frac{U_1 - U_2}{U_2} R_{\text{обр}}, \quad (16)$$

где $Z_{\text{РАСЧ.}}$ – расчетное значение модуля комплексного сопротивления измеряемого двухполюсника.

В соответствии с принципом суперпозиции напряжения на входах детекторов являются бигармоническими и содержат колебания на частотах $\omega_{\text{ГЕН.}}$ и $\omega_{\text{ПОМ.}}$

$$U_{1,2}(t) = U'_{1,2} \cos(\omega_{\text{ГЕН.}} t) + U''_{1,2} \cos(\omega_{\text{ПОМ.}} t), \quad (17)$$

где $U'_{1,2}$ – амплитуды колебаний на входах соответственно первого и второго детекторов, образованные действием генератора; $U''_{1,2}$ – амплитуды колебаний, образованные действием помехи.

Значения $U'_{1,2}$ и $U''_{1,2}$ определяются методами теории линейных электрических цепей

$$U'_{1,2} = |\dot{K}'_{1,2}(j\omega_{\text{ГЕН.}})| \cdot E_{\text{ГЕН.}}, \quad U''_{1,2} = |\dot{K}''_{1,2}(j\omega_{\text{ПОМ.}})| \cdot E_{\text{ПОМ.}}, \quad (18)$$

где $\dot{K}'_{1,2}$ и $\dot{K}''_{1,2}$ – комплексные коэффициенты передачи.

В частных случаях, когда измеряемый двухполюсник имеет емкостной характер и может быть представлен параллельным соединением активного сопротивления R_X и емкости C_X , либо индуктивный характер (последовательное соединение R_X и индуктивности L_X), передаточные функции могут быть представлены в виде

$$\dot{K}''_{1,2}(j\omega) = K_{1,2} \cdot \frac{1 + j\omega T_1}{1 + j\omega T_2}, \quad (19)$$

где $K_{1,2}$ – числовые коэффициенты;

T_1 и T_2 – эквивалентные постоянные времени.

Расчёт коэффициентов $K_{1,2}$, а также T_1 и T_2 выполняется на основе методов анализа линейных электрических цепей.

Исследование выполнено для двух вариантов реализации детекторов: последовательных диодных и синхронных (цепи подачи опорного колебания условно показаны на рисунке 7 пунктиром, в реальном устройстве помеха в цепь опорного колебания не попадет).

Расчёт спектрального состава выходного напряжения последовательного диодного детектора с $R_H C_H$ -нагрузкой осуществлен приведением суммы сигнала и помехи в одночастотное колебание тригонометрическим преобразованием и разложением его в ряд по биному Ньютона для получения вида АМ сигнала. В результате проведения преобразований эквивалентное колебание $v(t)$ имеет следующий вид:

$$v(t) = U(1 + m \cos(\omega_p t - \varphi) \cdot \sin(\omega_{ГЕН.} t + \Psi)), \quad (20)$$

где U – произведение U' на нулевой член разложения в ряд;

$\omega_p = \omega_{ГЕН.} - \omega_{ПОМ.}$ – разность частот генератора $\omega_{ГЕН.}$ и помехи $\omega_{ПОМ.}$;

m – отношение первого и нулевого членов разложения;

φ – начальная фаза сигнала генератора;

Ψ – фаза несущего колебания.

Расчет постоянной составляющей выходного напряжения детектора проведен на основе метода угла отсечки. Метод применим при выполнении двух условий: разность частот генератора и помехи много меньше значений частот генератора и помехи и соотношение амплитуд K много меньше единицы:

$$U'/U'' = K \ll 1, \quad (21)$$

где U' , U'' – амплитуды входного бигармонического колебания.

Для оценки влияния численного значения K в (21) на погрешность расчета постоянного напряжения на выходе амплитудного детектора проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных. Амплитуда U'' варьировалась при фиксированном значении амплитуды U' . На рисунке 8 приведены результаты исследования.

Экспериментальные исследования проведены с применением диода КД521А, значения элементов схемы $C_H=1$ мкФ, $R_H=10$ кОм, амплитуда $U'=10$ В на частоте $f_1=120$ кГц; амплитуда $U''=0...10$ В на частоте $f_2=122$ кГц.

Из приведенных на рисунке 8 данных следует, что погрешность расчета постоянного напряжения на выходе амплитудного детектора при бигармоническом входном сигнале по методике преобразования входного воздействия в эквивалентное амплитудно-модулированное колебание в зависимости от численного значения K в (21) не превышает 10% при $K < 0,6$ и не превышает 1% при $K < 0,15$.

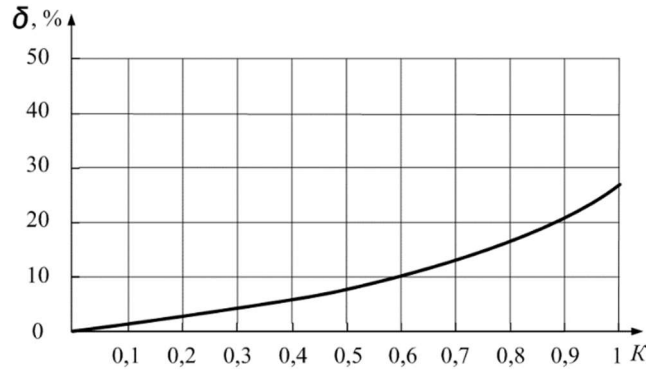


Рисунок 8 – Погрешность расчета выходного напряжения амплитудного детектора от соотношения амплитуд помехи и сигнала K

Расчёт спектрального состава выходных напряжений синхронных детекторов выполняется с применением соотношений (6)-(11).

Постоянная составляющая (полезный продукт детектирования) рассчитывается по формуле

$$U_{\text{ВЫХ.1,2}}(0) = \operatorname{Re} \left\{ \begin{aligned} &W_2^{1,2}[\omega_{\text{ГЕН.}}, -\omega_{\text{ГЕН.}}] \cdot \dot{K}'_{1,2}(j\omega_{\text{ГЕН.}}) \cdot E_{\text{ГЕН.}} \cdot U_{\text{ГЕН.}} \cdot e^{-j\varphi} + \\ &+ \frac{1}{2} \cdot \left[\begin{aligned} &W_2^{1,1}[\omega_{\text{ГЕН.}}, -\omega_{\text{ГЕН.}}] \cdot [\dot{K}'_{1,2}(j\omega_{\text{ГЕН.}}) \cdot E_{\text{ГЕН.}}]^2 + \\ &+ W_2^{1,1}[\omega_{\text{ПОМ.}}, -\omega_{\text{ПОМ.}}] \cdot [\dot{K}''_{1,2}(j\omega_{\text{ПОМ.}}) \cdot E_{\text{ПОМ.}}]^2 + \\ &+ W_2^{2,2}[\omega_{\text{ГЕН.}}, -\omega_{\text{ГЕН.}}] \cdot U_{\text{ГЕН.}}^2 \end{aligned} \right] \end{aligned} \right\}, \quad (22)$$

где φ – разность фаз колебаний $U_{\text{ГЕН.}}(t)$ и $\dot{K}'_{1,2}(j\omega_{\text{ГЕН.}}) \cdot E_{\text{ГЕН.}} \cdot \cos(\omega_{\text{ГЕН.}}t)$.

Гармоники на частотах генератора, помехи и комбинационные составляющие в спектрах выходных сигналов синхронных детекторов без учета продуктов, образованных на нелинейностях более высокого порядка определяются соотношениями

$$\begin{aligned} U_{\text{ВЫХ.1,2}}(\omega_{\text{ГЕН.}}) &= \\ &= W_1^1[\omega_{\text{ГЕН.}}] \cdot \dot{K}'_{1,2}(j\omega_{\text{ГЕН.}}) \cdot E_{\text{ГЕН.}} + W_1^2[\omega_{\text{ГЕН.}}] \cdot U_{\text{ГЕН.}} \cdot e^{j\varphi}, \end{aligned} \quad (23)$$

$$U_{\text{ВЫХ.1,2}}(\omega_{\text{ПОМ.}}) = W_1^1[\omega_{\text{ПОМ.}}] \cdot \dot{K}''_{1,2}(j\omega_{\text{ПОМ.}}) \cdot E_{\text{ПОМ.}}, \quad (24)$$

$$\begin{aligned} U_{\text{ВЫХ.1,2}}(\omega_{\text{ГЕН.}}; \omega_{\text{ПОМ.}}) &= \\ &= W_2^{1,2}[\omega_{\text{ГЕН.}}; \pm\omega_{\text{ПОМ.}}] \cdot \dot{K}''_{1,2}(j\omega_{\text{ПОМ.}}) \cdot E_{\text{ПОМ.}} \cdot U_{\text{ГЕН.}}, \end{aligned} \quad (25)$$

Устройство, реализующее предложенный способ измерения комплексного сопротивления двухполюсных электрических цепей методом амперметра-вольтметра с косвенным определением тока при действии помехи в цепи измеряемого сопротивления двухполюсника при использовании синхронных детекторов обладает повышенной помехоустойчивостью. На рисунке 9 приведены расчетные (пунктир) и экспериментально измеренные (сплошные линии) зависимости дополнительной погрешности измерения

сопротивления двухполюсника при наличии аддитивной помехи для последовательных диодных амплитудных детекторов (кривые 1) и синхронных детекторов (кривые 2).

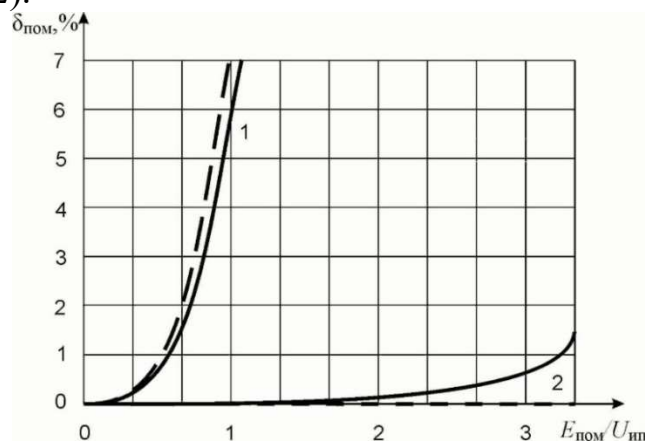


Рисунок 9 – Расчетные (пунктир) и экспериментально измеренные (сплошные линии) зависимости дополнительной погрешности измерения сопротивления двухполюсника при наличии аддитивной помехи

Таким образом, теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что устройство для измерения модуля комплексных сопротивлений двухполюсных цепей с синхронным детектированием измерительных сигналов обладает на 12 дБ увеличенным диапазоном амплитуд помехи при одинаковой дополнительной погрешности измерения в сравнении с устройством для измерения модуля комплексных сопротивлений двухполюсных цепей с амплитудным детектированием. На основе предложенного технического решения получен патент на изобретение «Способ определения составляющих внутреннего сопротивления химических источников тока».

Вторая часть четвёртого раздела посвящена разработке аппаратно-программного комплекса (АПК) дистанционного обслуживания аккумуляторных батарей. Задача, для решения которой предназначен комплекс, является техническое обслуживание аккумуляторных батарей и, в частности, измерение внутреннего сопротивления. По измеренному значению внутреннего сопротивления оценивается степень деградации аккумулятора.

АПК включают в состав системы гарантированного электропитания (СГЭП). Он монтируется в разрыв цепи «группа аккумуляторов» – «общая шина питания», что влечёт минимальные изменения конструкции СГЭП, не влияющие на работу системы электропитания оборудования в целом.

Аппаратно-программный комплекс состоит из двух основных блоков:

1. блока коммутации;
2. блока измерительного устройства.

Блок коммутации показан на общей функциональной схеме СГЭП с интегрированным комплексным устройством проведения технического обслуживания аккумуляторов. Схема приведена на рисунке 10.

Задачи, которые выполняет блок коммутации, заключаются в выводе из работы СГЭП группы аккумуляторов, для которой будут выполняться операции по техническому обслуживанию и коммутации каждого аккумулятора группы к соответствующему каналному модулю блока измерительного устройства. Блок измерительного устройства АПК представляет собой систему с входящими в её состав четырьмя каналными модулями и модулем управления. Каждый каналный модуль может работать с одним аккумулятором и выполнять функции технического обслуживания (измерение ёмкости, напряжения, внутреннего сопротивления). Модуль управления измерительного устройства координирует работу модулей управления с блоком коммутации, кроме того выполняет функции сбора данных измерений и обмена ими, а также командами управления, с автоматизированным рабочим местом оператора через интерфейс *Ethernet*.

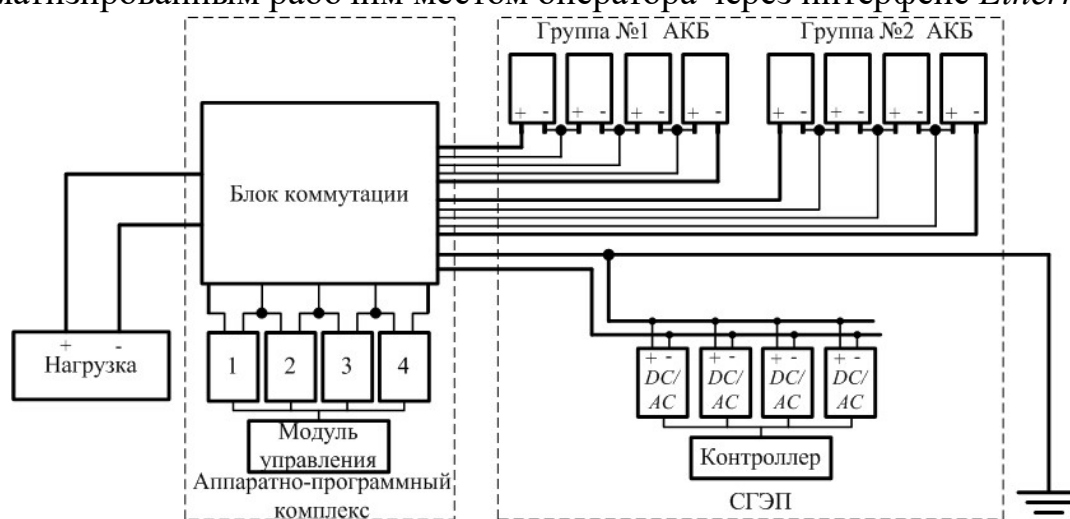


Рисунок 10 – Схема подключения АПК в состав СГЭП

Последовательность действий, которые может выполнять АПК, работающий в составе СГЭП, может быть различной. Мероприятия по техническому обслуживанию одной группы аккумуляторных батарей могут выполняться в следующем порядке:

1. измерение температуры и напряжения аккумуляторов в группе;
2. измерение внутреннего сопротивления каждого аккумулятора;
3. измерение емкости каждого аккумулятора в группе.

В третьей части четвертого раздела раскрыто решение вопроса стабилизации тока цепей питания источника оптического излучения.

Используя известное свойство полевого транзистора, а также используя результаты, полученные в третьем разделе диссертации, в части описания значений тока стока полевого транзистора в пологой области выходных ВАХ, можно построить источник оптического излучения.

Источник оптического излучения, содержащий группу светодиодов, включенных определенным образом, стабилизатор тока и две входные клеммы питающего переменного напряжения. Группы светодиодов представляют собой последовательную цепь, в которой каждая группа состоит из встречно

параллельно соединенных оптических диодов. Стабилизатор тока выполнен из двух частей, каждая из которых содержит полевой транзистор и защитный диод, анод которого соединен с истоком и затвором полевого транзистора, а катод со стоком полевого транзистора, при этом сток первого и сток второго ПТ соединены с началом и концом группы оптических диодов соответственно, а истоки первого и второго ПТ подсоединены к входным клеммам.

Режим работы ПТ находится в насыщенном режиме, в результате чего получаем источник оптического излучения, работающий в режиме постоянного свечения.

Заключение

В диссертационной работе получены следующие результаты:

1. Распространен метод нелинейных токов на устройства синхронного детектирования радиосигналов. Получены новые соотношения для определения выходного тока активных элементов с двумя управляющими электродами при синхронных воздействиях.

2. Разработана универсальная функция для аппроксимации ВАХ во всей области допустимых напряжений на электродах полевых триодов и тетродов, в том числе и в инверсной области напряжений.

3. Определена зависимость расчетного значения погрешности, вносимой близкорасположенной по частоте помехой, от соотношения амплитуд сигнала и помехи при детектировании сигнала амплитудным детектором.

4. Разработаны новые устройства:

4.1 Устройство определения составляющих внутреннего сопротивления химических источников тока.

4.2 Система гарантированного электропитания с аппаратно-программным комплексом для тестирования и заряда аккумуляторных батарей.

4.3 Устройство определения параметров химических источников тока.

4.4 Источник оптического излучения.

Таким образом, сформулированные в работе задачи решены, цель достигнута. Это позволило повысить помехоустойчивость и расширить функциональные возможности устройств и систем для измерения модуля комплексного сопротивления двухполюсных электрических цепей и параметров химических источников тока.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:

Статьи в журналах из перечня ВАК

1. Южанин М.В., Туев В.И., Денисенко А.В., Гаммершмидт М.М. Усовершенствованное решение по техническому обслуживанию аккумуляторных батарей, входящих в состав силовых систем

гарантированного электропитания // Докл. Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2017. – Том 20, №1. – С. 126-130.

2. Антонишен И.В., Кох А.И., Туев В.И., Южанин М.В. Применение модифицированной функции гиперболического тангенса для аппроксимации вольтамперных характеристик светоизлучающих диодов // Докл. Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники №2 (24), ч.2. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2011. – С. 154-156.

3. Антонишен И.В., Туев В.И., Южанин М.В. Способ измерения внутреннего сопротивления химических источников // Докл. Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники №2 (2), ч.2. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2010. – С. 183-186.

4. Туев В.И., Южанин М.В. Расчет дополнительной погрешности измерения сопротивлений двухполюсных электрических цепей в условиях помех // Электросвязь. – 2009, №3. – С. 38-40.

5. Туев В.И., Южанин М.В. Применение модифицированной функции гиперболического тангенса для аппроксимации вольт-амперных характеристик полевых транзисторов // Известия Томского Политехнического Университета. – 2009. – №4. – Том 314. – С. 135-138.

Статья в иностранном издании

6. Vasily I. Tudev, Maxim V. Yuzhanin FET frequency converter analysis with two synchronous impacts // International journal of advanced biotechnology and research. – 2019. – Vol.10. – Special issue 1. – P.186-190.

Другие публикации по теме диссертации

7. Туев В.И., Южанин М.В. Универсальная аппроксимация передаточных вольт-амперных характеристик полевых транзисторов // Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности: Сборник трудов Пятой международной научно-практической конференции. - СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2008. - Т.12. – С. 299-300.

8. Туев В.И., Южанин М.В. Анализ спектра на выходе амплитудного детектора при бигармоническом входном воздействии // Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития: Доклады Международной научно-практической конференции. В 2 частях. – Томск: В-Спектр, 2007. – Ч.1. – С. 86-88.

9. Антонишен И.В., Иванов А.В., Мухин Г.Р., Туев В.И., Южанин М.В. Питание светодиодов от сети переменного тока // Научная сессия ТУСУР - 2011: материалы докл. Всеросс. науч.-техн. конф. В 6 т. – Томск: В-Спектр, 2011. – Т. 2. – С. 265-267.

10. Антонишен И.В., Туев В.И., Южанин М.В. Измерение значений параметров внутреннего сопротивления химических источников тока // Научная сессия ТУСУР – 2010: материалы докл. Всеросс. науч.-техн. конф. В 5 т. – Томск: В-Спектр, 2010. – Т. 4. – С. 101-103.

11. Южанин М.В., Туев В.И. Спектральный анализ слабонелинейных электрических цепей при синхронных гармонических воздействиях // Научная сессия ТУСУР – 2009: материалы докл. Всеросс. науч.-техн. конф. В 5 т. – Томск: В-Спектр, 2009. – Т. 2. – С. 72-75.

12. Южанин М.В. Аппроксимация вольт-амперных характеристик IGBT транзистора // Наука. Технологии. Инновации: материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 7-и частях. - Новосибирск: изд-во НГТУ, 2008. – Часть 1. – С. 238-239.

13. Южанин М.В., Туев В.И. Использование импульсных сигналов в устройстве для измерения полных сопротивлений двухполюсных электрических цепей // Научная сессия ТУСУР – 2008: материалы докл. Всеросс. науч.-техн. конф. В 5 т. – Томск: В-Спектр, 2008. – Т. 2. – С. 258-260.

14. Южанин М.В., Туев В.И. Аппроксимация вольт-амперных характеристик полевых транзисторов // Научная сессия ТУСУР – 2008: материалы докл. Всеросс. науч.-техн. конф. В 5 т. – Томск: В-Спектр, 2008. – Т. 2. – С. 295-297.

15. Туев В.И., Южанин М.В. Анализ электрических цепей класса Винера-Вольтерра при синхронных гармонических воздействиях // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. ст., ред.: А.И.Громыко, А.В.Сарафанов. – Красноярск: Сиб. Федер. ун-т; Политехн. ин-т, 2007. – С. 127-129.

16. Туев В.И., Южанин М.В. Исследование влияния аддитивной помехи на точность измерения сопротивлений двухполюсных электрических цепей методом амперметра-вольтметра // Научная сессия ТУСУР – 2007: материалы докл. Всеросс. науч.-техн. конф. В 5 т. – Томск: В-Спектр, 2007. – Т. 4. – С. 28-30.

17. Туев В.И., Южанин М.В. Анализ слабонелинейных электрических цепей при синхронных гармонических воздействиях // Микроэлектроника и информатика – 2007: материалы докладов 14-й Всеросс. науч.-техн. конф. – Москва: МИЭТ, 2007. – С. 328.

18. Туев В.И., Южанин М.В. Влияние помех на точность измерения сопротивления кабельных линий связи большой протяженности // Проблемы информационной безопасности государства, общества и личности: материалы девятой Всеросс. науч.-техн. конф. – Томск: В-Спектр, 2007. – С. 113-114.

19. Южанин М.В. Расчёт спектра выходного тока преобразователя частоты при синхронных гармонических воздействиях // Научная сессия ТУСУР – 2018: материалы докл. Всеросс. науч.-техн. конф. в 3 ч. – Томск: В-Спектр, 2018. – Ч. 1. – С. 88-90.

Патенты

1. Пат. №183327 Российская Федерация, МПК⁷: G 01 R 27/02. Устройство определения параметров химических источников тока // Солдаткин В.С. (RU), Шкарупо В.С. (RU), Туев В.И. (RU), Южанин М.В. (RU) – №2018109787; заявл. 19.03.2018; опубл. 18.09.2018, бюл. №26.

2. Пат. №130088 Российская Федерация, МПК⁷: G 01 R 31/36. Система гарантированного электропитания с аппаратно-программным комплексом для тестирования и заряда аккумуляторных батарей // Денисенко А.В. (RU), Южанин М.В. (RU), Барсуков А.В. (RU) – №2013102109/28; заявл. 01.03.2013; опубл. 10.07.2013, бюл. №19.

3. Пат. №2449302 Российская Федерация, МПК⁷: G 01 R 31/36, 27/02. Способ определения составляющих внутреннего сопротивления химических источников тока // Антонишен И.В., Мисюнас А.О., Туев В.И., Южанин М.В. Российская Федерация, // Антонишен И.В. (RU), Мисюнас А.О. (RU), Туев В.И. (RU), Южанин М.В. (RU) - №2010145973/28; заявл. 10.11.2010; опубл. 27.04.2012, бюл. №12.

4. Пат. №108885 Российская Федерация, МПК⁷: H 01 L 33/00. Источник оптического излучения // Антонишен И.В. (RU), Бомбизов А.А. (RU), Иванов А.В. (RU), Мухин Г.Р. (RU), Олисовец А.Ю. (RU), Туев В.И. (RU), Южанин М.В. (RU) – №2011122260/28; заявл. 01.06.2011; опубл. 27.09.2011, бюл. №27.