На правах рукописи

Якимов Евгений Валерьевич

ИССЛЕДОВАНИЕ, РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ ОТ ПОМЕХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ БОЛЬШИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ КОНТРОЛЕ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Специальность:05.11.13 - Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск - 2004

Работа выполнена в Томском политехническом университете

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор Жуков Владимир Константинович.

Официальные оппоненты:
д.т.н., профессор Смирнов Геннадий Васильевич;
к.т.н., доцент Свендровский Александр Романович.

Ведущая организация: ОАО “НИКИ”, г. Томск

Защита состоится ″2″ марта 2004 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при Томском политехническом университете по адресу: Россия, 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, Библиотека НИИ интроскопии.

С диссертацией можно ознакомится в библиотеке Томского политехнического университета по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 53

Автореферат разослан ″__″ _____ 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета Винокуров Б.Б.

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы (работы). Кабельные изделия (кабели, провода, шнуры) являются одними из наиболее широко используемых элементов электротехники и электроники. Контроль качества кабельных изделий производится по многим электрическим и механическим параметрам, и, в том числе, по сопротивлению изоляции.

Основной частью приборов (тераомметров) для измерения сопротивления изоляции являются преобразователи больших сопротивлений.

Основными характеристиками тераомметров являются верхний предел измерения, точность, рабочее напряжение и время установления показаний. Как правило, для увеличения точности и верхнего предела приходится увеличивать время измерения и рабочее напряжение. Типовые параметры приборов: 10^5 ТОм при погрешности измерения 10% (прибор ЕК6-7), 100 ТОм при погрешности измерения 10% (прибор Е6-13А), 100 ТОм при погрешности измерения 15% (прибор Ф507). Для большинства приборов время установления на пределах до 100 ТОм не превышает 30 секунд, а рабочее напряжение 100 – 1000 В.

Приведенные параметры, однако, относятся только к режиму измерения чисто активного сопротивления. При исследовании сопротивления изоляции кабелей возникают ненормируемые режимы эксплуатации тераомметра, и параметры прибора (быстродействие и точность) могут отличаться от параметров, приведенных в паспорте на прибор. Основной причиной является большая электрическая емкость кабельных изделий.

Кроме того, существенную проблему представляет обеспечение защиты преобразователей больших сопротивлений от внешних помех частотой 50 Гц. Решением данной проблемы, как правило, является экранирование объекта исследования, но для кабелей данное решение не всегда допустимо и удобно.

Анализ технической литературы показал, что данным вопросам уделяется недостаточно внимания. Настоящая работа несет задачу восполнить данные пробелы в области контроля сопротивления изоляции кабелей.

Цель диссертационной работы.

- изучение влияния электрической емкости кабеля и низкочастотных помех на динамические характеристики и погрешность прибора, измеряющего сопротивление изоляции;
- разработка методов защиты от влияния данных факторов.

Направление исследований. Анализ существующих и исследование новых принципиальных схем преобразователей больших сопротивлений тераомметров.

Методы исследований. Компьютерное моделирование и экспериментальные исследования работы преобразователей сопротивления тераомметров.

Достоверность и обоснованность. Все выводы, полученные в результате теоретических исследований, проверены и подтверждены путем экспериментальных исследований.

На защиту выносятся следующие положения:

- схема преобразователя сопротивления тераомметра на основе инвертирующего усилителя с дополнительным образцовым резистором;
- схема преобразователя сопротивления тераомметра на основе инвертирующего усилителя с ключевым элементом на входе;
- схема преобразователя сопротивления тераомметра на основе инвертирующего усилителя с интегратором в первом каскаде и ФНЧ во втором;
- схема защищенного от помех тераомметра для измерения сопротивления изоляции кабеля.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- проведено исследование влияния электрической емкости кабелей при измерении сопротивления их изоляции различными типами приборов;
- предложены и экспериментально исследованы методы повышения быстродействия тераомметра при контроле сопротивления изоляции кабелей;

– проведено экспериментальное исследование влияния внешних помех промышленной частоты при измерении сопротивления изоляции;
– проведен анализ методов защиты от помех промышленной частоты при измерении сопротивления изоляции;
– разработан и внедрен на кабельном производстве образец многодиапазонного тераомметра для контроля сопротивления изоляции

Практическая ценность диссертационной работы заключается в том, что:

– разработаны, изготовлены и настроены два разнотипных варианта многодиапазонных тераомметров, один из тераомметров предназначен для контроля сопротивления изоляции кабелей, а второй использовался при научных исследованиях студентов;
– результаты и методика теоретических и экспериментальных исследований влияния электрической емкости кабелей и внешних помех переменного тока, могут быть использованы разработчиками тераомметров при создании новых приборов.

Реализация результатов. Результаты диссертационных исследований внедрены в производство в ОАО "НИКИ", г.Томск и в учебный процесс на кафедре информационно-измерительной техники Томского политехнического университета.

Грант. Индивидуальный грант Томского политехнического университета “Исследование, разработка и применение методов защиты от помех преобразователей больших сопротивлений, применяемых при контроле изоляции кабельных изделий ”, 2003.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

8-ой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». – Москва, МЭИ (ТУ), 2002;

4-ой Международной научно-практической конференции студентов, аспиранов и молодых ученых «Современные техника и технологии». – Томск, ТПУ, 1998;

5-ой Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». – Томск, ТПУ, 1999;

8-ой Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». – Томск, ТПУ, 2002;

9-ой Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». – Томск, ТПУ, 2003.

на заседаниях научно-методического семинара кафедры информационно-измерительной техники Томского политехнического университета.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и тринадцати приложений. Основная часть изложена на 114 страницах машинописного текста, содержит 39 рисунков и фотографий, 57 математических формул, 24 таблицы. Список литературы содержит 52 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность поиска новых принципов построения приборов для измерения сопротивления изоляции кабелей.

Первая глава посвящена анализу параметров кабельных изделий и существующих методов измерения больших сопротивлений, а также постановке задачи диссертационной работы.

Приводятся сведения об электрической емкости $C_{ИЗ}$ и сопротивлении изоляции $R_{ИЗ}$ отечественных кабелей. Указываются требования, предъявляемые государственным стандартом к определению сопротивления изоляции кабелей:

испытательному напряжению, погрешности измерения, времени снятия показаний.

Дается анализ методов измерения больших сопротивлений с указанием основных параметров отечественных и зарубежных приборов, реализующих данные методы.

По результатам проведенного анализа сделаны следующие выводы.

1. Для контроля сопротивления изоляции кабельных изделий длиной до 100 м требуется прибор, имеющий верхний предел измерения не менее 500 ГОм, точность не хуже 10 %, рабочее напряжение от 100 до 1000 В.
2. В настоящее время существует широкая номенклатура приборов для измерения больших сопротивлений. При этом предел измерения может достигать 100 ТОм (при погрешности измерения 0.5 %), 10^4 ТОм (при погрешности измерения 20 %). Рабочее напряжение достигает 100 – 1000 В. Однако, приборы имеют следующие недостатки:
   - многие схемы измерения сопротивления требуют осторожности при работе, в частности для некоторых схем недопустимо замыкание измерительных клемм накоротко, требуются специальные цепи защиты;
   - согласно техническим описаниям и инструкциям по эксплуатации измерение сопротивлений свыше 1 ГОм необходимо проводить в специально сконструированной экранирующей камере для устранения влияния внешних помех переменного тока, однако применение экранирующей камеры при контроле параметров некоторых изделий по электрическому сопротивлению не всегда возможно;
   - отсутствует оценка влияния на показания приборов электрической емкости при исследовании объектов (кабельных изделий), имеющих большое сопротивление, причем емкость кабельных изделий может достигать 0.05 мкФ при длине до 100 м.

Во второй главе проводится анализ влияния электрической емкости кабеля и помех переменного тока частотой 50 Гц при измерении больших сопротивле-

ний. Рассматриваются методы защиты преобразователей больших сопротивлений от помех переменного тока и устранения влияния электрической емкости кабеля. Основной упор сделан при этом на схемотехнические методы, как наиболее оптимальные для универсальных измерительных приборов.

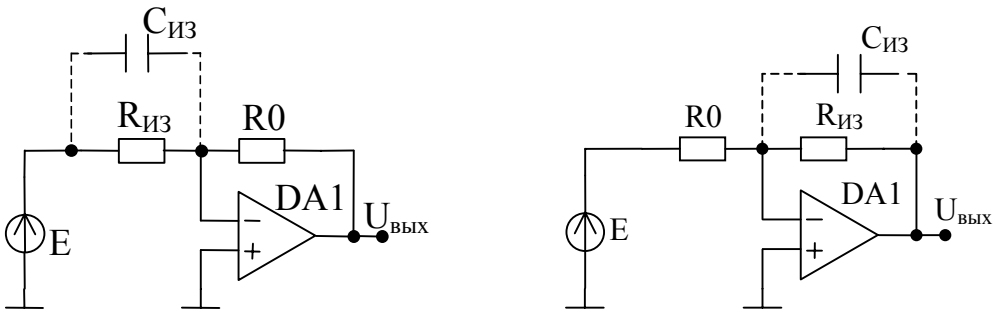
При анализе проблемы помехоустойчивости тераомметров для кабельных изделий было выделено два вида помех: помехи низкой частоты (промышленной частоты 50 Гц) и помехи, вызванные наличием электрической емкости объекта исследования (кабеля). В соответствии с данной классификацией воздействие каждого вида помех на измерительные приборы рассматривается отдельно.

В научной литературе методик и результатов оценки воздействия электрической емкости объектов на показания тераомметров не было встречено. Поэтому проводится математическое и экспериментальное моделирование динамики известных преобразователей больших сопротивлений при исследовании объектов, имеющих большую электрическую емкость (кабельных изделий).

Следует оговорить, что под временем установления показаний прибора $T_{уст}$ понимается время, необходимое для установления напряжения, соответствующего значению сопротивления на уровне 95 % (или 105 %) от значения, которое должно установиться по окончании переходного процесса. Для некоторых схем это время совпадает со временем установления выходного напряжения на уровне 95 % (105 %), но в случае, если уравнение преобразования сопротивления в напряжение нелинейное, то производится расчет выходного напряжения преобразователя, соответствующего отклонению измеряемого сопротивления на 5 % от установившегося значения. Основное моделирование переходных процессов проводилось в пакете программ Orcad 9.1.

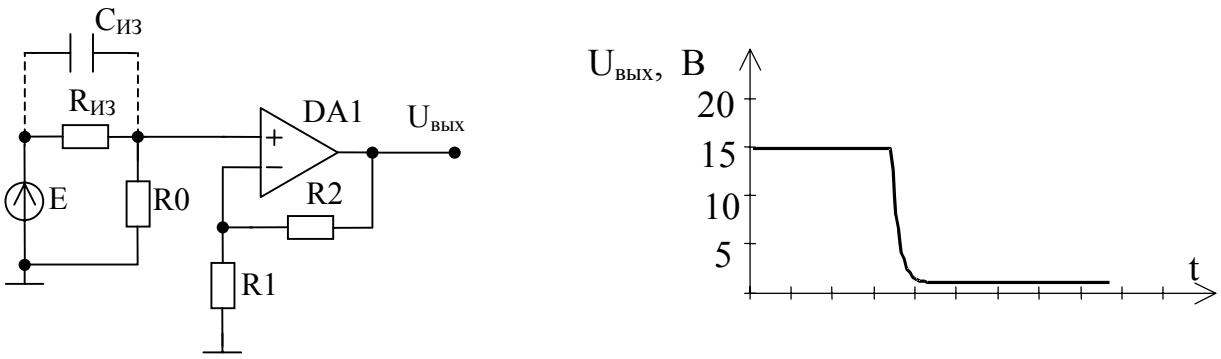
Была исследована работа трех известных схем преобразователей сопротивления, применяемых в тераомметрах: схема с обратной шкалой на основе инвертирующего операционного усилителя (рис. 1.а), схема с линейной шкалой

на основе инвертирующего операционного усилителя (рис. 1.б) и схема на основе потенциометрического метода (рис. 2.а).



а) б)

Рис. 1. Тераомметр с обратной шкалой (а) и с линейной шкалой (б) на основе инвертирующего операционного усилителя



а) б)

Рис. 2. Тераомметр на основе потенциометрического метода (а) и переходный процесс при включении тераомметра с обратной шкалой на основе инвертирующего операционного усилителя (б)

Для тераомметров, выполненных по схеме на рис. 1.а, теоретически время установления показаний определяется быстродействием самого прибора и практически не зависит от электрической емкости кабеля, поскольку к объекту исследования приложено постоянное напряжение от источника с малым выходным сопротивлением. На самом деле сравнительно большая емкость $C_{из}$ образует дифференциатор напряжения. При подаче на исследуемое сопротивление опорного напряжения на выходе преобразователя будет стремиться установиться большое выходное напряжение, и усилитель войдет в режим насыщения.

На рис. 2.б показан характер переходного процесса при подаче на исследуемое сопротивление опорного напряжения.

Моделирование работы тераомметра по схеме на рис. 1.а при различных емкостях объекта исследования показывает, что время установления может достигать 1 минуты при емкости $C_{ИЗ}$ равной 100 нФ и сопротивлении R0 равном 1 ГОм (при питании усилителя ±150 В). Измеряемое сопротивление при этом мало влияет на скорость установления показаний и может достигать значений, многократно превышающих образцовое сопротивление.

В схеме на рис. 1.б постоянная времени заряда конденсатора, определяемая измеряемым сопротивлением и емкостью объекта ($\tau_{ИЗ}=R_{ИЗ}\cdot C_{ИЗ}$), будет определять время установления выходного сигнала усилителя, которое составит около 3026 с (50.4 мин) при $C_{ИЗ}$=100 нФ, R0=10 ГОм, $R_{ИЗ}$=10 ГОм.

В схеме на рис. 1.а при аналогичных параметрах кабеля и сопротивлении R0=1 ГОм время установления в 10 раз меньше (286 с при питании ±15 В).

Таким образом, применение линейной схемы преобразования сопротивления в напряжение при наличии большой емкости параллельной исследуемому сопротивлению нецелесообразно.

При использовании тераомметров, собранных по схеме на рис. 2.а (потенциометрический метод измерения), также как и в тераометрах с обратной шкалой на основе инвертирующего операционного усилителя емкость $C_{ИЗ}$ образует дифференцирующую цепь. В момент подачи опорного напряжения на исследуемое сопротивление на образцовом резисторе происходит скачок напряжения (рис. 2.б), а далее емкость заряжается с постоянной времени, определяемой величиной образцового сопротивления R0 и емкости $C_{ИЗ}$.

Если образцовое сопротивление равно R0=1 ГОм, емкость $C_{ИЗ}$=100 нФ, измеряемое сопротивление $R_{ИЗ}$=1000 ГОм, опорное напряжение E= 100 В, то выходное напряжение $U_{вых}$=1 В при коэффициенте передачи усилителя равном К=10 должно установиться за время равное 992 с.

Таким образом, было показано, что известные схемы преобразователей сопротивлений тераомметров имеют недостаточное быстродействие при исследовании сопротивления изоляции кабелей.

Поиск методов увеличения быстродействия тераомметров дал несколько различных решений.

Первый метод. Выше было показано, что в схеме на основе инвертирующего операционного усилителя с обратной шкалой (рис. 1.а) время установления показаний зависит от соотношения уровней опорного напряжения и напряжения питания усилителя, причем, сравнивая результаты моделирования, приведенные на рис. 3, можно сделать вывод, что чем больше уровни питания, тем меньше время установления. Данный вывод нигде ранее не был указан, поэтому представляет интерес для разработчиков тераомметров.

Например, расчет показал, что время установления уменьшается в 4-5 раз при повышении питания в 10 раз. При опорном напряжении E=–100 В, емкости кабеля $C_{ИЗ}$=100 нФ, образцовом сопротивлении R0=1 ГОм и питании усилителя $U_п$=±150 В время установления будет равно 52.2 с, тогда как при питании $U_п$=±15 В время установления равно 210 с.

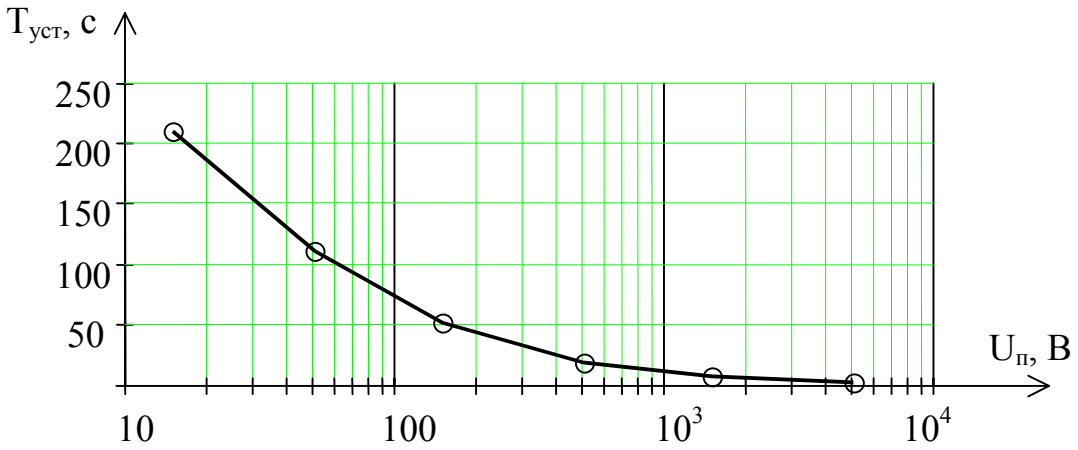


Рис. 3. Зависимость времени установления показаний в тераомметре с обратной шкалой на основе инвертирующего операционного усилителя от напряжения питания усилителя: E=–100 В, $C_{ИЗ}$=100 нФ, $R_{ИЗ}$=100 ГОм, R0=1 ГОм

Данный эффект обусловлен тем, что при повышении напряжения питания увеличивается допустимый динамический диапазон выходного напряжения и усилитель раньше достигает линейного режима работы.

Второй вариант увеличения быстродействия – схема преобразователя на основе инвертирующего операционного усилителя с дополнительным образцовым резистором (рис. 4.а), на которую автором данной работы получено авторское свидетельство.

Например, при образцовых сопротивлениях R01=R02=1 ГОм может быть измерено сопротивление $R_{ИЗ}$=100 ГОм. При емкости $C_{ИЗ}$=100 нФ время установления будет равно 748 с.

В установившемся режиме выходной сигнал преобразователя равен

$$U_{вых} = -\frac{R02}{R01} \cdot \frac{R_{ИЗ}}{R02 + R_{ИЗ}} \cdot E . \qquad (1)$$

Если различаются отклонения выходного напряжения на величину $\Delta U_{вых}$ от значения напряжения, соответствующего $R_{ИЗ}=\infty$, то можно измерить максимальное сопротивление $R_{ИЗ}$ равное

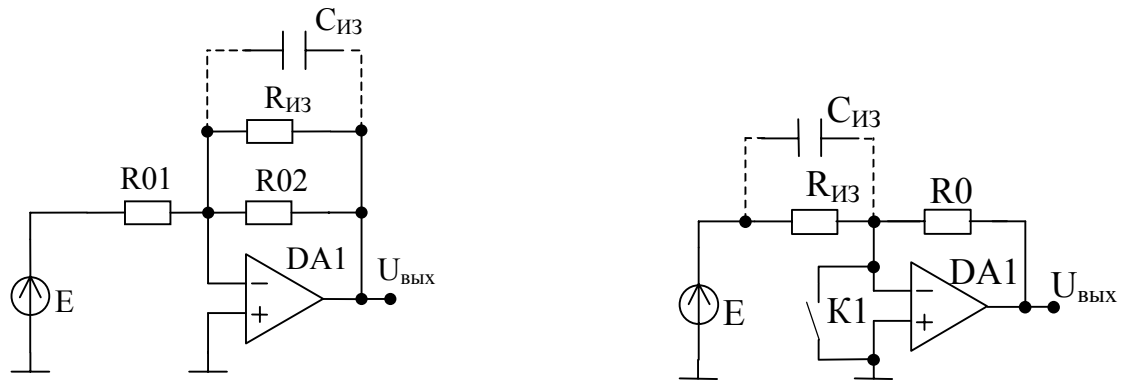
$$R_{ИЗ.max} = \frac{R02}{\frac{E}{E - \Delta U_{вых}} \cdot \frac{R02}{R01} - 1} . \qquad (2)$$

При R01=R02=1 ГОм, E=100 В и $\Delta U_{вых}$=1 В $R_{ИЗ.max}$= 99 ГОм.

При R01=R02=0.1 ГОм тот же предел обеспечивается, если $\Delta U_{вых}$=0.1 В.

Время установления при этом равно 98.4 с при образцовых сопротивлениях R01=R02=0.1 ГОм, измеряемом сопротивлении $R_{ИЗ}$=100 ГОм и емкости $C_{ИЗ}$=100 нФ, тогда как при R01=R02=1 ГОм оно равно 748 с.

Видно, что улучшение свойств преобразователя по схеме на рис. 4.а может быть достигнуто увеличением соотношения измеряемого и образцового сопротивлений, однако при этом уменьшается диапазон изменения выходного напряжения усилителя и возрастает чувствительность к помехам переменного тока.



а) б)

Рис. 4. Преобразователь на основе инвертирующего усилителя с дополнительным образцовым резистором (а) и преобразователь с обратной шкалой на основе инвертирующего усилителя, работающего в ключевом режиме (б)

Сравнивая работу схемы преобразователя с дополнительным образцовым резистором и схему на основе потенциометрического метода, можно сделать вывод о том, что они имеют одинаковое быстродействие.

Третий вариант увеличения быстродействия тераомметров – введение ключевого режима работы, при котором исследуемый объект периодически подключается к источнику опорного напряжения (при этом заряжается емкость $C_{из}$), а затем прибор переводится в режим измерения (рис. 4.б). Следует отметить, что предложенная схема ранее не использовалась в тераомметрах.

Моделирование показывает, что после размыкания ключа К1 и окончания переходного процесса на выходе усилителя устанавливается напряжение обратно пропорциональное измеряемому сопротивлению. При этом емкость $C_{из}$ практически не замедляет работу преобразователя.

Исследование схемы показывает, что время установления не зависит от параметров объекта измерения (емкости и сопротивления). Кроме того, образцовый резистор также не влияет на быстродействие схемы. Все рассмотренные выше методы значительно уступают по скорости установления показаний данному преобразователю.

Для подтверждения результатов теоретических расчетов динамики переходных процессов в известных и предложенных в диссертационной работе преобразователей сопротивления тераомметров при работе с кабелями было проведено экспериментальное.

Результаты теоретического расчета незначительно отличаются от экспериментальных результатов. Погрешности обусловлены в основном неточностью примененных при эксперименте элементов (конденсаторов и высокоомных резисторов). Прослеживается качественная взаимосвязь между емкостью объекта исследования и временем установления показаний.

Второй проблемой для кабельных тераомметров является воздействие низкочастотных помех сети 220 В 50 Гц.

Воздействие внешней помехи при работе с большими сопротивлениями можно представить в виде генератора переменного тока помехи $J_п$, подключенного к инвертирующему входу операционного усилителя и общему проводу схемы.

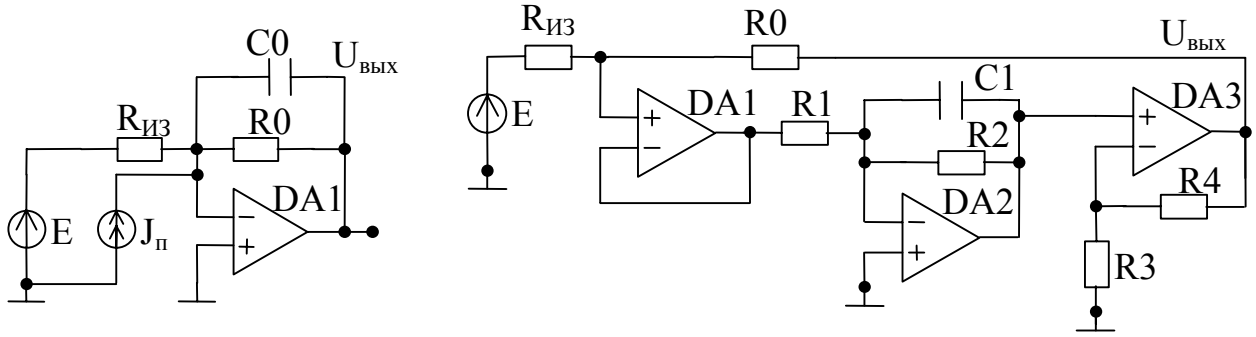
Общим подходом защиты от низкочастотных помех является многокаскадное построение УПТ преобразователя сопротивления и введение в его состав дополнительных фильтрующих звеньев. В этом случае помеха фильтруется непосредственно в преобразователе. При отсутствии защиты в составе УПТ преобразователя, фильтрация сигнала в последующих каскадах не дает эффекта, поскольку сигнал уже искажен.

Было исследовано три основных схемотехнических метода защиты от помех преобразователей сопротивления тераомметров.

Помехоустойчивость в тераомметре с одним ОУ (рис. 5.а) достигается подключением параллельно резистору обратной связи конденсатора С0.

Если R0=1 ГОм, $R_{ИЗ}$=100 ГОм, Е=–100 В, С0=3200 пФ, то частота среза АЧХ преобразователя для тока помехи равна 0.05 Гц. При частоте помехи 50 Гц АЧХ преобразователя для тока помехи $J_п$ спадает на 60.05 дБ по сравнению со значением АЧХ на нулевой частоте (примерно в 1000 раз). Это означает, что

при воздействии помехи частотой 50 Гц и амплитудой эквивалентного тока $J_п$=10 нА, сигнал помехи становится примерно в 100 раз меньше полезного сигнала при напряжении на измеряемом сопротивлении 100 В. Время установления при этом равно $T_{уст}$=9.6 с.



а) б)

Рис. 5. Помехоустойчивый тераомметр с одним ОУ (а) и с повторителем напряжения в первом каскаде (б)

Вторая схема тераомметра с защитой от низкочастотных помех показана на рис. 5.б.

При частоте среза АЧХ преобразователя для тока помехи равной 0.05 Гц, обеспечивается подавление помехи частотой 50 Гц на 60 дБ и время установления $T_{уст}$=9.6 с.

Следует отметить, что на выход повторителя напряжения DA1 помеха проходит без фильтрации. Поэтому при некотором уровне помех произойдет насыщение повторителя. То есть помехоустойчивость данной схемы зависит от уровней максимального допустимого выходного напряжения повторителя.

Наиболее устойчивая к помехам схема (рис. 6) была предложена автором диссертации. Частным случаем данной схемы является схема на рис. 7.

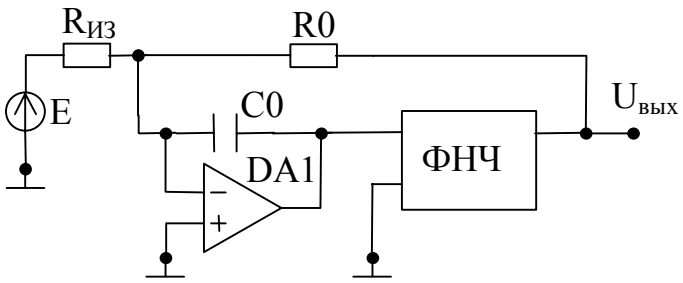


Рис. 6. Обобщенная схема помехоустойчивого тераомметра с обратной шкалой на основе инвертирующего усилителя с интегратором в первом каскаде

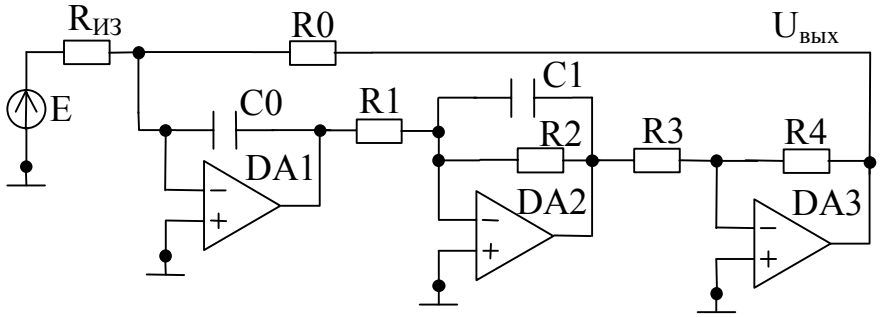


Рис. 7. Помехоустойчивый тераомметр с интегратором в первом каскаде

Если частота среза АЧХ преобразователя сопротивления для тока помехи равна 2 Гц, то обеспечивается подавление помехи частотой 50 Гц на 60 дБ и время установления $T_{уст}$=0.534 с.

Таким образом, преобразователь сопротивления в постоянное напряжение при введении дополнительно конденсатора и фильтра низких частот в цепь УПТ обеспечивает наиболее оптимальную защиту от помех переменного тока низкой частоты, то есть при одинаковом с другими схемами ослаблении помех обеспечивается большее быстродействие (примерно в 20 раз).

Для сравнительного анализа различных схем тераомметров по критерию помехоустойчивости была проведена экспериментальная проверка. Было исследовано три схемы, приведенные на рис. 5.а, 5.б, 7.

Сравнивая наилучшие результаты по схемам, можно сделать вывод о том, что наилучшими характеристиками обладает схема на рис. 7. Но, если по условиям эксперимента допустимо время установления показаний около 1 мин и выше, то может быть также использована схема на рис. 5.а.

Схема на рис. 5.б, с повторителем напряжения на входе, может быть использована в диапазоне до 1 ГОм, но уступает схеме с интегратором на входе по стабильности показаний.

Измерять сопротивления свыше 1 ГОм могут только схемы на рис. 5.а, 7. Но время установления в схеме на рис. 7 намного меньше. Например, при сопротивлении 82 ГОм время установления показаний схемы на рис. 5.а равно 72 с, тогда как для схемы на рис. 7 оно равно 3 с. При этом обеспечивается также преимущество по стабильности показаний.

В третьей главе дается описание реализованных технических решений, полученных по результатам теоретических и экспериментальных исследований, приводятся результаты испытаний разработанного прибора на производстве.

Разработанный тераомметр для контроля изоляции кабелей (рис .8) имеет следующие особенности:

1. Преобразователь сопротивления в напряжение кабельного тераомметра сочетает устойчивость к помехам сети 50 Гц 220 В и приемлемое время установления показаний (не более 1 минуты).
2. Прибор имеет линейную цифровую шкалу, как наиболее удобную для измерительных приборов. В прибор введена аналоговая схема линеаризации и аналого-цифровой преобразователь с цифровым индикатором.
3. Прибор оснащен цифровым секундомером и регистровой памятью результата измерения для фиксации результата измерения по истечении минуты (согласно ГОСТ 3345-76 время снятия показаний тераомметра с момента приложения измерительного напряжения к кабелю должно быть от 1 до 5 минут).
4. Прибор предусматривает автоматическую разрядку кабеля перед проведением измерения и управление моментом подачи измерительного напряжения на объект исследования за счет использования переключателей на основе герконовых реле, управление которыми синхронизировано с показаниями секундомера, встроенного в прибор.

5. Использован стабилизатор напряжения 100 В для создания измерительного напряжения.
6. Пределы измерения прибора (9 пределов): 2, 20, 200 МОм, 2, 20, 200 ГОм, 2, 20, 200 ГОм.

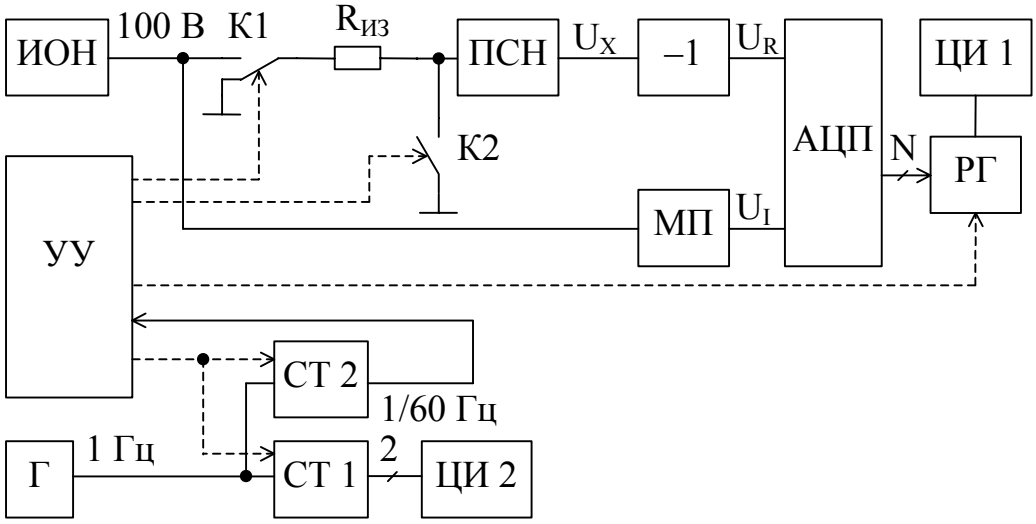


Рис. 8. Структурная схема цифрового кабельного тераомметра

Тераомметр содержит следующие блоки: ИОН – источник опорного напряжения +100 В; К1, К2 – ключи на основе герконовых реле; УУ – устройство управления тераомметра; Г – генератор импульсов частотой 1 Гц; СТ1 – счетчик импульсов (2 десятичных разряда); СТ2 – счетчик импульсов (делитель частоты на 60); ЦИ 2 – цифровой индикатор секундомера; ПСН – преобразователь сопротивления в напряжение (U_X–выходное напряжение преобразователя); "–1" – инвертор полярности напряжения; МП – масштабный преобразователь; АЦП – аналого-цифровой преобразователь напряжения (U_I, U_R – напряжения на измерительном и опорном входах АЦП, N – код на выходе АЦП); $R_{ИЗ}$ – измеряемое сопротивление; РГ – регистровая память; ЦИ 1 – цифровой индикатор измерителя сопротивления.

Тераомметр работает следующим образом.

Измеряемое сопротивление $R_{ИЗ}$ преобразуется в напряжение U_X при помощи блока ПСН. При этом используется опорное напряжение 100 В, формируемое блоком ИОН. Ключ К1 обеспечивает подачу опорного напряжения на

объект исследования и разрядку кабеля перед измерением. Ключ К2 обеспечивает ускоренную зарядку кабеля опорным напряжением при измерении.

Напряжение U_X поступает на блок инвертора, выходной сигнал которого подается на вход опорного напряжения U_R АЦП.

Опорное напряжение 100 В преобразуется с помощью блока МП до уровня, приемлемого АЦП и поступает на вход измеряемого напряжения U_I АЦП.

АЦП преобразует отношение измеряемого напряжения к опорному в цифровой код N, который записывается в регистровую память РГ. Выходы регистров подключены к цифровому индикатору ЦИ 1, который показывает значение измеряемого сопротивления. Работой регистров РГ управляет устройство управления УУ, по сигналу которого обеспечивается фиксация результата измерения.

Выдача сигналов с устройства управления УУ на различные узлы прибора синхронизирована по времени, поэтому устройство управления обеспечивает запуск встроенного в прибор цифрового секундомера и отслеживает сигнал, соответствующий минутному интервалу. Кроме того, в устройстве управления обеспечивается формирование сигнала для управления ключом К2, который замыкается на несколько секунд при зарядке исследуемого кабеля опорным напряжением перед началом измерения.

Цифровой секундомер реализуется на основе блоков Г, СТ1, СТ2, ЦИ 2. Генератор Г обеспечивает формирование эталонных импульсов частотой 1 Гц. Счетчики СТ1, СТ2 по сигналу устройства управления УУ начинают подсчет числа импульсов генератора Г. При этом счетчик СТ1 содержит два десятичных разряда и обеспечивает максимальное показание времени 99 с после чего происходит сброс и процесс счета продолжается заново. Счетчик СТ2 представляет собой делитель частоты на 60, поэтому первый импульс на его выходе появляется через 60 с после начала работы секундомера. Сигнал счетчика СТ2 поступает в устройство управления УУ, которое прекращает подачу измерительного

напряжения на объект $R_{ИЗ}$ и выдает на регистры РГ сигнал фиксации результата измерения.

При разработке преобразователя сопротивлений были учтены результаты исследований 2 главы. Был сделан вывод о том, что необходимо синтезировать схемы, приведенные на рис. 4.б и 7. Полученная схема приведена на рис. 9.

Для разработанного тераомметра был выбран аналоговый линеаризатор (рис. 10) на основе операционных усилителей и АЦП, измеряющего отношение напряжений.

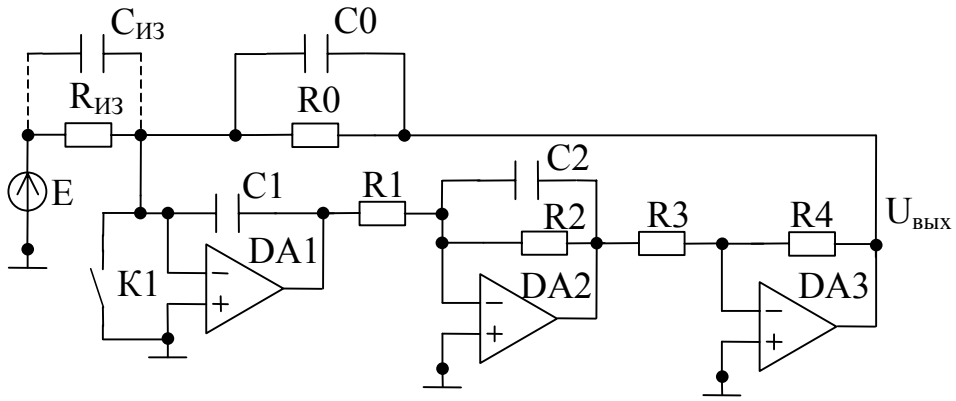


Рис. 9. Схема преобразователя сопротивлений кабельного тераомметра

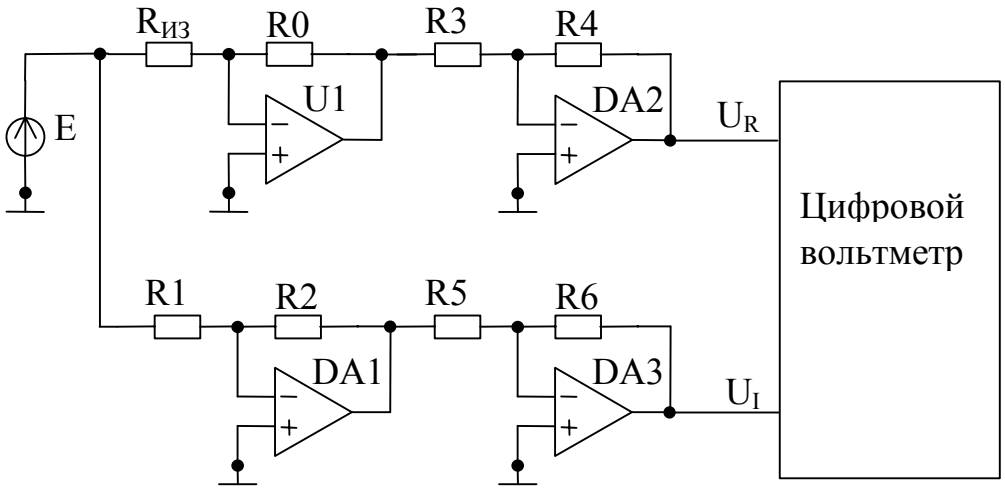


Рис. 10. Схема аналогового линеаризатора кабельного тераомметра

Поскольку цифровой вольтметр измеряет отношение напряжений на измерительном и опорном входах, цифровой код N на выходе вольтметра будет линейно зависеть от измеряемого сопротивления

$$N = S \cdot \frac{U_I}{U_R} = S \cdot \frac{R3}{R4} \cdot \frac{R2}{R1} \cdot \frac{R6}{R5} \cdot \frac{R_{ИЗ}}{R0}, \qquad (3)$$

где S – коэффициент преобразования цифрового вольтметра.

Таким образом, в цифровом тераомметре при точной настройке параметров преобразования цифрового вольтметра обеспечивается линейность шкалы отсчета, а также независимость от точности установки опорного напряжения E. Кроме того, резисторы R3 – R6 могут быть использованы при калибровке шкалы прибора, поскольку не влияют на ее линейность.

При анализе погрешностей разработанного тераомметра было установлено, что наибольшее влияние оказывают погрешность входного тока операционного усилителя DA1 преобразователя сопротивления (0.25 %), погрешность образцового резистора R0 (которая может быть устранена при калибровке прибора) и дополнительная погрешность от помех переменного тока сети 220 В 50 Гц.

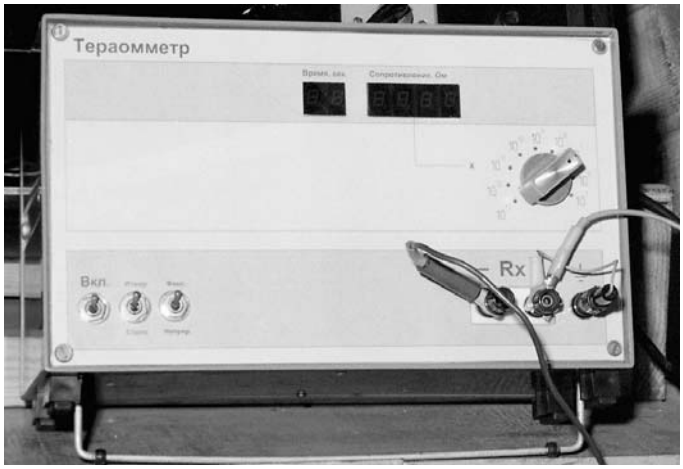


Рис. 11. Цифровой тераомметр для измерения сопротивления изоляции кабелей

Разработанный тераомметр был внедрен на кабельном производстве в ОАО "НИКИ", г. Томск. Было проведено предварительное испытание на соответствие показаний прибора действительным значениям сопротивления изоляции кабелей. При испытании использовались промышленно изготовленные тераомметры Ф507 и ТК-1. Время снятия показаний с момента приложения измерительного напряжения к исследуемому кабелю было одинаковым для всех приборов и равным 1 минуте.

Результаты испытаний показали, что расхождение результатов исследования кабелей испытуемым тераомметром и промышленными приборами в основном не превышает 20 % и обусловлено невысоким классом точности приборов. Значительное расхождение результатов при исследовании кабелей с пла-

стмассовой изоляцией (РК75, КМПВ) обусловлено различием динамических характеристик приборов на пределах свыше 10^{11} Ом. То есть для правильного сопоставления результатов необходимо устанавливать время снятия показаний значительно больше 1 минуты.

Например, для кабеля РК75 при длине 192 м емкость равна 12.9 нФ. В техническом описании на прибор Ф507 указано, что при наличии емкости $C_{ИЗ}$ у объекта исследования время установления показаний на уровне 99% будет равно

$$T_{уст} = \frac{П \cdot C_{ИЗ}}{20}, \qquad (4)$$

где П – положение переключателя пределов тераомметра.

При $П=10^{12}$ Ом и емкости $C_{ИЗ}$=12.9 нФ $T_{уст}$=645 с (10.75 минут).

В то же время ГОСТ 3345-76 ограничивает время снятия показаний от 1 до 5 минут.

В разработанном тераомметре время установления показаний на уровне 99% на пределе "10^{12}" Ом равно 18.4 с.

Заключение

1. Известные схемы преобразователей сопротивления тераомметров имеют низкое быстродействие при работе с объектами, имеющими большую электрическую емкость (кабелями). Например, при образцовом сопротивлении R0=1 ГОм, измеряемом сопротивлении $R_{ИЗ}$=100 ГОм, емкости объекта $C_{ИЗ}$=100 нФ время установления для схемы на основе инвертирующего операционного усилителя с линейной шкалой будет равно примерно 30 000 с. В то же время в схеме на основе потенциометрического метода установление происходит за 755 с, а в схеме на основе инвертирующего операционного усилителя с обратной шкалой при питании ±15 В и опорном напряжении 100 В – за 210 с.
2. Схема преобразователя сопротивления тераомметра на основе инвертирующего усилителя с обратной шкалой обеспечивает большее быстродействие

при увеличении напряжения питания. Например, время установления уменьшается в 4-5 раз при повышении питания в 10 раз. При опорном напряжении равном –100 В, емкости кабеля $C_{ИЗ}$=100 нФ, образцовом сопротивлении R0=1 ГОм и питании усилителя ±150 В время установления будет равно 52.2 с, тогда как при питании ±15 В время установления равно 210 с.

3. Схема преобразователя сопротивления тераомметра на основе инвертирующего усилителя с дополнительным образцовым резистором позволяет обеспечить примерно одинаковое быстродействие со схемой на основе потенциометрического метода, однако не имеет опасных режимов, при которых возможен выход из строя входного усилителя. Нет необходимости разрабатывать цепи защиты усилителя. Увеличение быстродействия методом введения дополнительного образцового резистора мало эффективно при больших емкостях объектов исследования (для кабельных изделий).
4. Схема преобразователя сопротивления тераомметра на основе инвертирующего усилителя с ключевым элементом обеспечивает наилучшее быстродействие. Причем время установления практически не зависит от параметров объекта измерения (емкости и сопротивления), а также от сопротивления образцового резистора. При замыкании ключа на 2 с теоретически обеспечивается время установления не более 2.8 с. При экспериментальном исследовании время установления не превышало 10 с (при времени замыкания ключа 3 с).
5. Известные схемы преобразователей сопротивления тераомметров не обеспечивают требуемой защиты от помех переменного тока частотой 50 Гц, то есть степень подавления помех и быстродействие схем не соответствуют предъявляемым требованиям.
6. Наилучшее сочетание быстродействия и ослабления помех переменного тока частотой 50 Гц имеет схема преобразователя сопротивления тераомметра на основе инвертирующего усилителя с интегратором в первом каскаде и

ФНЧ во втором. При этом емкость конденсатора, входящего в состав интегратора, должна находиться в диапазоне от 500 до 3000 пФ.

Публикации. Основные научные результаты достаточно полно отражены в опубликованных работах:

1. Якимов Е.В. О влиянии паразитной емкости при измерении больших сопротивлений. // Восьмая международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». Сб. статей. – Томск: Изд-во ТПУ, 2002. – С. 106-107.

2. Якимов Е.В. Миляев Д.В. Кондуктометрический преобразователь для измерения влажности древесины. // Четвертая областная научно - практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». Сб. статей. – Томск: Изд-во ТПУ, 1998. – С. 86-87.

3. Якимов Е.В. Низковольтный тераомметр–влагомер. // Пятая областная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». Сб. статей. – Томск: Изд-во ТПУ, 1999. – С. 95-97.

4. Якимов Е.В. Сравнение тераомметров по критерию помехоустойчивости. // Восьмая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». Тезисы докладов. В 3 т. – Москва: Издательство МЭИ, 2002. – Т.1. – С. 201-202.

5. Свидетельство на полезную модель №17626, G 01 R 27/00. Цифровой омметр. / Якимов Е.В., Жуков В.К., Миляев Д.В.

6. Патент России №2205413. G 01 R 27/00. Преобразователь активного сопротивления в постоянное напряжение. / Якимов Е.В., Жуков В.К., Миляев Д.В.

7. Якимов Е.В., Жуков В.К. Помехоустойчивость тераомметров на основе измерителей тока. // Измерительная техника. – 2003. – №4. – С. 35-39.

8. Якимов Е.В. Особенности применения преобразователя сопротивления в напряжение на основе операционного усилителя с дополнительным образцовым сопротивлением. / Деп. в ВИНИТИ №2242-В2002 от 24.12.02. – 25 с.