

6
А-55

ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОННЫХ УПРАВЛЯЮЩИХ МАШИН (ИНЭУМ)

А. Н. БАТАШЕВ

На правах рукописи

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОЕМКОСТНОГО МЕТОДА
ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ И ВОДНЫХ
РАСТВОРОВ И РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА
ФАЗОЕМКОСТНЫХ УРОВНЕМЕРОВ**

05.253—Приборы и устройства автоматики и телемеханики

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

**МОСКВА
1970**

+

ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОННЫХ УПРАВЛЯЮЩИХ МАШИН (ИНЭУМ)

А. Н. БАТАШЕВ

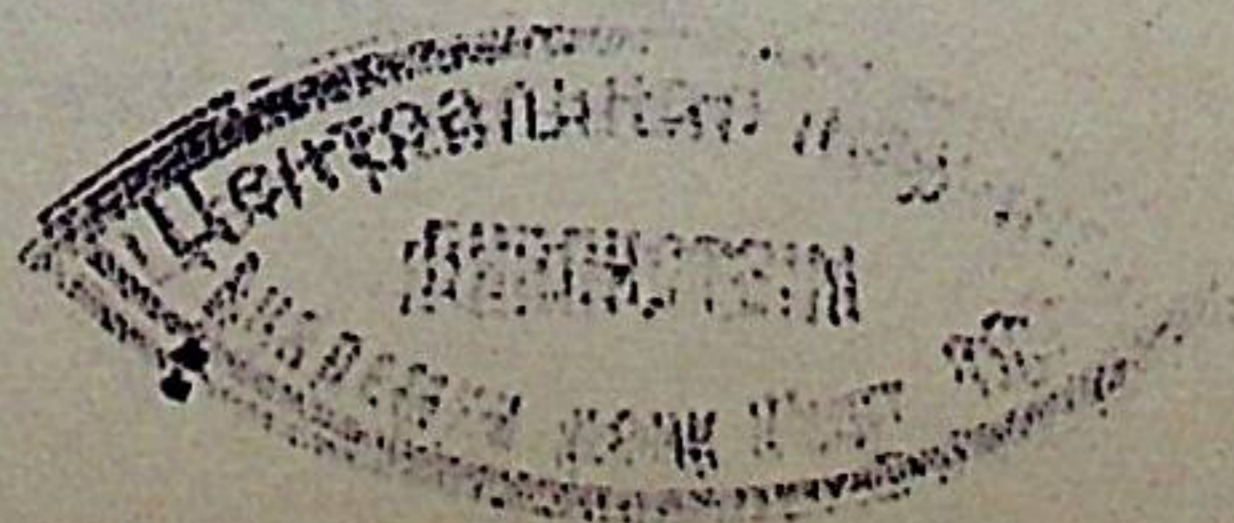
На правах рукописи

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОЕМКОСТНОГО МЕТОДА
ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ И ВОДНЫХ
РАСТВОРОВ И РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА
ФАЗОЕМКОСТНЫХ УРОВНЕМЕРОВ

05.253—Приборы и устройства автоматики и телемеханики

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МОСКВА
1970



621-52
ASS
Работа выполнена в Государственном Научно-исследовательском институте теплоэнергетического приборостроения.

Научный руководитель: профессор д. т. н. Г. Г. Иордан
Официальные оппоненты: д. т. н. В. А. Викторов
к. т. н. А. У. Ялышев

Ведущее предприятие указано в решении Объединенного ученого совета.

Автореферат разослан 12 Июль 1971 г.

Публичная защита диссертации состоится 12 Февраль 1971 г. в 14 час. на заседании Объединенного ученого совета при Институте электронных управляющих машин (ИНЭУМ) в помещении НИИЧаспрома (Часовая ул. 24/1).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЧаспрома.

Автореферат направляется Б-ка им. Мстисла

Просим Вас и всех заинтересованных лиц Вашей организации принять участие в заседании Объединенного ученого совета, посвященного защите диссертации, или прислать свои отзывы в двух экземплярах по адресу: Москва А-315, Часовая ул. 24/1 Объединенному ученому совету при ИНЭУМ.

Ученый секретарь Объединенного совета

к. т. н. КРУГЛОВ Г. А.

Широкое развитие комплексной автоматизации технологических процессов и связанная с ним потребность в новых совершенных средствах автоматизации, в том числе в современных средствах контроля уровня жидкостей, явились причиной появления ряда работ в области исследования прогрессивных методов измерения уровня, разработки новых уровнемеров.

Наиболее перспективными оказались волновые методы измерения уровня, наилучшим образом отвечающие тенденциям развития теплоэнергетического приборостроения и средств автоматизации, позволяющие создавать уровнемеры с простейшими первичными преобразователями (датчиками), предназначенными, главным образом, для канализации энергии колебаний.

Значительную группу жидких сред, уровень которых необходимо контролировать в современных технологических процессах, составляют вода и водные растворы кислот, щелочей и солей. Наибольшее распространение получили емкостные методы контроля уровня этих сред, в частности фазоёмкостный, заключающийся в непрерывном автоматическом восстановлении фазы стоячей волны в линии передачи или иной колебательной системе, нагрузка которой включает в себя изолированный (то есть содержащий по крайней мере один изолированный электрод) емкостный датчик уровня и элемент обратной связи, служащий целям компенсации.

Реферируемая диссертация посвящена исследованию фазоёмкостного метода измерения уровня и разработке фазоёмкостных уровнемеров воды и водных растворов. Диссертация состоит из семи глав, заключения и списка цитированной литературы из 76 наименований.

В первой главе дается сравнительный анализ волновых методов измерения уровня, описанных в обширной литературе, и рассматриваются возможности использования этих методов и соответствующих устройств для осуществления точного, длительного (несколько тыс. часов) и дистанционного измерения уровня водных сред — от воды высокой очистки (с удельным сопротивлением по-

рядка 10^8 ом·см) до растворов солей, щелочей и кислот — в широком диапазоне температур (до 280°C), давлений (до 65 кгс/см²) и концентраций растворенных веществ, в резервуарах сложной конфигурации, в условиях наклонов и радиоактивного фона; определяются трудности, мешающие использовать тот или иной метод.

Что касается фазоёмкостных уровнемеров, то на первых стадиях их разработки в НИИ Теплоприборе были получены обнадеживающие результаты по возможности их применения для указанных сред в указанных реальных условиях. Однако испытания этих уровнемеров выявили наряду с достоинствами и существенные недостатки, а именно: наличие значительных (до десятков процентов) погрешностей, вызванных постепенной смачиваемостью изолирующего покрытия чувствительного элемента датчика растворами солей и образованием на нем проводящих осадков и пленок, непостоянством солесодержания и температуры воды высокой очистки.

Предпринятые рядом авторов первые теоретические проработки фазоёмкостного способа не дали рекомендаций по повышению точности измерения. Более того, сам метод исследования и его исходные посылки не позволяли активно вторгнуться в природу указанных погрешностей. Объясняется это тем, что при анализе фазоёмкостного метода определялись условия, при которых выходную величину датчика можно было считать чистой ёмкостью (скалярном), а влияние активных потерь, ввиду их малости, можно было бы не учитывать.

Для большинства задач представление преобразовательных функций измерительных устройств скалярными функциями оказывалось приемлемым. В тех случаях, когда требовалась повышенная точность измерения, приборостроители включали в конструкцию первичного преобразователя (датчика) компенсационные секции или дополнительные чувствительные элементы, регистрирующие величину дополнительных факторов, действующих в объекте контроля и имеющих по отношению к полезному сигналу характер помехи. При этом увеличивалось количество каналов связи усложненного датчика с соответственно усложненным вторичным прибором. Следует заметить, что представление преобразовательных свойств основного и компенсационного измерительных каналов в виде скалярных функций и в данном случае оказывалось достаточным, ибо приводило к построению точных измерительных устройств.

Однако, развитие технологии выдвинуло такие измерительные задачи, которые оказалось невозможно решить методами, основанными на скалярном представлении пре-

образовательных свойств чувствительных и измерительных устройств. Так, например, погрешности, вызываемые выпадением из контролируемой среды проводящих осадков на чувствительном элементе изолированного ёмкостного датчика уровня, невозможно уменьшить компенсационными секциями, поскольку эффект, вызываемый осадками на том или ином участке датчика, зависит от режима погружений-осушений этого участка, невозпроизводимого на другом участке, и, следовательно, меру суммарного эффекта нельзя регистрировать в какой-либо единственной точке. Кроме того, в ряде случаев, когда воздействие побочных факторов можно локализовать (переменная температура, электропроводность, диэлектрическая проницаемость контролируемой или вытесняемой ею среды), не всегда допустимо устанавливать в датчике уровнемера компенсационные секции, ибо это связано с нежелательным появлением верхнего или нижнего неизмеряемого уровня.

Путь решения подобных задач, принятый в диссертации, основан на развитии волновых методов, характерной особенностью которых является возможность передачи по одному каналу связи нескольких независимых величин, характеризующих волновой процесс.

Автором было высказано предположение, что представление преобразовательных функций вторичных измерительных устройств в виде функций нескольких переменных, задаваемых выходным сигналом первичного преобразователя, поможет расширить границы применения некоторых волновых методов и улучшить эти методы в отдельных своих свойствах, прежде всего — в части подавления помех измерению. В качестве метода измерения, в рамках которого, согласно предварительным опубликованным проработкам автора, возможна реализация этого положения, был выбран фазоёмкостный метод.

Диссертационная работа, проведенная в Научно-исследовательском институте теплоэнергетического приборостроения с 1958 по 1969 год, определяет задачи и направление исследований следующим образом:

1. Сравнительный анализ способов измерения уровня и обоснованный выбор наиболее перспективного из них для измерения уровня воды и водных растворов.

2. Разработка метода исследования измерительных устройств, основанного на возможности передачи нескольких независимых электрических величин по одному каналу связи.

3. Исследование и выбор рационального принципа построения структурных схем фазоёмкостных уровнемеров.

4. Исследование зависимостей составляющих выходного сигнала датчика от совокупности воздействующих факторов—основного и побочных—и выработка рекомендаций для оптимальной конструкции датчика и соответствующих требований ко вторичному прибору.

5. Исследование преобразования составляющих выходного сигнала датчика некоторыми колебательными системами.

6. Нахождение передаточных функций некоторых звеньев следящих систем на переменном токе, линейных, инверсных и линеаризующих преобразователей комплексной проводимости.

7. Исследование компенсирующих устройств, преобразующих униполярное напряжение в электрическую емкость или комплексную проводимость.

8. Исследование стационарного и нестационарного состояния следящей системы фазомерного уровня, нахождение уравнения равновесия, критериев устойчивости, исследование влияния побочных факторов на показания уровнемера и разработка способов повышения точности измерения.

9. Анализ погрешностей фазомерных уровнемеров, их статических и динамических характеристик, разработка методики их инженерного расчета и выдача рекомендаций к проектированию таких уровнемеров.

10. Проведение экспериментальных исследований, создание фазомерных уровнемеров воды и водных растворов, освоение их серийного производства и внедрение в эксплуатацию.

Вторая глава посвящена методу анализа и синтеза структурных схем фазомерных уровнемеров. В ней математически описывается принцип, названный принципом многомерного измерения и заключающийся в совместном многомерном векторном преобразовании многих величин, характеризующих выходной сигнал датчика (и, соответственно, входной сигнал вторичного прибора) с целью компенсации влияния вредных побочных факторов.

Вводится понятие воздействующего вектора W : его составляющие—независимые величины, характеризующие выходной сигнал датчика, которые могут быть переданы по каналу связи ко вторичному прибору. Количество последних определяет порядок пространства n , в котором задается вектор W . Выходной сигнал U_v вторичного прибора является непрерывной скалярной функцией состав-

ляющих вектора W , или скалярным полем $U_v(W)$. Градиент этого поля

$$S = \text{grad } U_v(W)$$

получает название n -мерного векторного коэффициента преобразования вторичного прибора, а традиционная формула преобразования записывается в виде скалярного произведения:

$$dU_v = (S \cdot dW). \quad (1)$$

Условие сохранения зависимости показаний от измеряемой величины t_1 при независимости их от побочных факторов t_2, \dots, t_n записывается в виде системы уравнений:

$$\left(S \cdot \frac{\partial W}{\partial t_1}\right) \neq 0; \left(S \cdot \frac{\partial W}{\partial t_i}\right) = 0 \text{ при } i = 2, \dots, n. \quad (2)$$

В этом случае (как и при использовании $n-1$ дополнительных компенсационных каналов, обладающих скалярными преобразовательными свойствами) возможна компенсация $n-1$ побочных факторов. Принцип многомерного измерения открывает возможность решения той же задачи без введения дополнительных каналов связи и компенсационных секций.

В качестве методологической основы исследования фазомерных уровнемеров и как следствие принципа многомерного измерения предложен частный метод траекторий вектора комплексной проводимости, соответствующий двумерной области задания воздействующего вектора W . Составляющими вектора W являются реактивная и активная составляющие комплексной проводимости датчика. Годографы вектора W , являющегося функцией воздействующих на датчик факторов (уровня, содержания, температуры, проводящих осадков на покрытиях), получают название траекторий комплексной проводимости или, сокращенно, ТКП по тому или иному фактору.

Каждой точке области задания вектора W однозначно соответствует определенная величина выходного сигнала вторичного прибора, или его показаний. Вводится понятие линии одинаковых показаний—геометрического места точек на плоскости задания вектора W , которым соответствуют одинаковые показания вторичного прибора. Тангенс угла наклона линии одинаковых показаний, взятый с обратным знаком, или, иными словами, чувствительность прибора к активной составляющей, поделенная на чувствительность прибора к реактивной составляющей, получает название реакции.

Для достижения минимальной зависимости показаний от выбранного фактора необходимо и достаточно совместить ТКП по этому фактору с линией одинаковых показаний.

На основании анализа метода траекторий получены следующие выводы:

1. Конфигурация и наклон ТКП зависят, помимо характеристик среды, от соотношения конструктивных элементов датчика.

2. Конфигурация и наклон линий одинаковых показаний зависят от принципа устройства вторичного прибора и соотношений параметров его схемы.

3. Наклон ТКП по выбранному побочному фактору определяет величину и знак реакции, которой должен обладать вторичный прибор, чтобы иметь минимальную погрешность от выбранного фактора.

Во второй главе, помимо этого, рассматриваются особенности преобразования уровня жидкости в электрическую емкость и блок-схемы фазомерных устройств. Констатируется, что проводимость на клеммах первичного преобразователя (датчика) имеет комплексный характер, и ее составляющие являются функциями воздействующих факторов.

Датчик, за проводимостью которого организуется слежение, включен в нагрузку колебательной системы фазомерного прибора. Параметры этой колебательной системы таковы, что функция, описывающая зависимость амплитуды напряжения на ее входе от проводимости нагрузки, имеет по крайней мере один минимум. Цепь регулирования, охватывающая колебательную систему, управляет импедансом элемента обратной связи так, что напряжение на входе системы поддерживается вблизи минимума, что соответствует автоматическому восстановлению фазы стоячей волны в этой системе. Такая цепь регулирования является экстремальной.

Экстремальные регуляторы могут быть поисковыми и беспереисковыми, и такое разделение существует в классе фазомерных приборов. В первом случае сигнал поиска воздействует на некий элемент, входящий в нагрузку колебательной системы. Во втором—ко входу системы подключается ячейка, осуществляющая смещение и деформацию экстремальных характеристик. Экстремальные регуляторы фазомерных устройств—поисковые и беспереисковые—могут быть также статическими или астатическими в зависимости от отсутствия или наличия в цепи регулирования интегрирующих звеньев.

В третьей главе рассматриваются вопросы теории изолированного емкостного датчика уровня и определяются

траектории вектора его комплексной проводимости при изменении уровня и при воздействии побочных факторов, указанных выше.

Первая задача, решаемая в главе, заключается в нахождении ТКП при изменении солесодержания водного раствора, что вызывает лишь изменение его удельной электропроводности. Показано, что ТКП в данном случае является полуокружностью с центром на мнимой оси. Вводится параметр конструкции датчика κ :

$$\kappa = 1 + \frac{C_1}{\epsilon_2 C_0}, \quad (3)$$

где C_1 — емкость конденсатора, образованного изолированным электродом датчика и поверхностью изолирующего покрытия;

C_0 — емкость конденсатора, образованного той же изолирующей поверхностью и другим, неизолированным электродом;

ϵ_2 — диэлектрическая проницаемость контролируемой среды (в данном случае воды).

Показано, что если принять емкость датчика, заполненного идеальной (непроводящей) водой за единицу, то диаметр ТКП по электропроводности будет равен $(\kappa - 1)$. Каждой точке ТКП будет соответствовать единственное значение тангенса угла потерь $\operatorname{tg} \delta$, при прочих неизменных условиях однозначно определяемое величиной солесодержания. Это соответствие выражается через дугу φ в радианах, отсчитанную от нижней точки окружности:

$$\kappa \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} = \operatorname{tg} \delta. \quad (4)$$

Показано, что ТКП по электропроводности, соответствующие разным положениям уровня, будут подобны друг другу, а коэффициент подобия будет равен отношению уровней. ТКП по уровню будут прямыми, проходящими через точку на мнимой оси, соответствующую нулевому уровню, и будут либо пересекать ТКП по электропроводности (в точках с дуговой координатой φ), либо касаться (в точке с координатой φ_0). Эта координата φ_0 определяет (4), соответствующий $\operatorname{tg} \delta_0$. Величина $\operatorname{tg} \delta_0$ отделяет, применительно к конкретной задаче, среды, которые можно условно назвать „электропроводными“, от сред, условно называемых „неэлектропроводными“. Найдено выражение для $\operatorname{tg} \delta_0$:

$$\operatorname{tg} \delta_0 = \sqrt{\frac{\kappa(\epsilon_2 - \epsilon_3)}{\epsilon_2}}, \quad (5)$$

где ϵ_3 — диэлектрическая проницаемость среды, вытесняемой контролируемой средой.

Отсюда следует вывод, что граница между „проводящими“ и „непроводящими“ контролируемыми средами может быть установлена лишь применительно к конкретной измерительной задаче и определяется не только электрофизическими характеристиками сред и частотой, на которой производится измерение, но и конструкцией датчика (в данном случае ее параметром κ).

Показано, что существует оптимальное значение κ_0 , при котором отношение погонной емкости датчика к разнице показаний при изменении электропроводности от нуля до бесконечности максимально:

$$\kappa_0 = 1 + \sqrt{\frac{\epsilon_3}{\epsilon_2}}. \quad (6)$$

В случае сред „вода—воздух“ (или пар) $\kappa_0 = 1,11$.

Вторая задача — нахождение ТКП при изменении температуры контролируемой среды.

Изменение температуры приводит:

— к изменению величины κ за счет расширения изолирующего покрытия и соответствующего изменения его диэлектрической проницаемости, согласно закону Клаузиуса-Мосотти, а также за счет изменения диэлектрической проницаемости воды ϵ_2 ;

— к изменению $\operatorname{tg} \delta$ за счет упомянутого изменения ϵ_2 и за счет изменения удельной электропроводности.

Зависимости величин κ и φ от температуры находятся путем подстановки в выражения (3) и (4) известных из литературы значений указанных выше электрофизических величин при разных температурах, и таким образом строятся искомые ТКП для заданной величины солесодержания и для заданного начального значения κ .

Третья задача — нахождение ТКП при образовании проводящего слоя на изолирующем покрытии электрода датчика и на конструктивных элементах.

Вначале рассматривается и оценивается эффект тонкого проводящего слоя на изолирующем покрытии отдельного цилиндрического электрода конечной длины. (Тонким слоем считается слой, погонное сопротивление которого можно считать действительной величиной). Показано, что такой слой можно смоделировать четырех-

полюсником, элементы матрицы сопротивлений которого определяются следующими выражениями:

$$\left. \begin{aligned} z_{11} = z_{22} &= \sqrt{\frac{R_1}{2\omega C_1}} \cdot \left(\frac{\operatorname{sh} al - \sin al}{\operatorname{ch} al - \cos al} - j \frac{\operatorname{sh} al + \sin al}{\operatorname{ch} al - \cos al} \right), \\ z_{12} &= \sqrt{\frac{2R_1}{\omega C_1}} \left(\frac{\operatorname{sh} \frac{al}{2} \cos \frac{al}{2} - \sin \frac{al}{2} \operatorname{ch} \frac{al}{2}}{\operatorname{ch} al - \cos al} - \right. \\ &\quad \left. - j \frac{\operatorname{sh} \frac{al}{2} \cos \frac{al}{2} + \sin \frac{al}{2} \operatorname{ch} \frac{al}{2}}{\operatorname{ch} al - \cos al} \right), \end{aligned} \right\} (7)$$

где

$$\alpha = \sqrt{2\omega R_1 C_1},$$

C_1 — погонная емкость изолированного электрода;

R_1 — погонное сопротивление слоя на покрытии;

l — длина электрода.

Введена величина Δl , имеющая размерность длины, обратная величине α :

$$\Delta l = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{2\omega R_1 C_1}}. \quad (8)$$

Показано, что бесконечно длинный электрод, изолирующее покрытие которого покрыто тонким проводящим слоем, обладает комплексной проводимостью, действительная составляющая которой тождественно равна мнимой, иными словами, такой электрод по входному сопротивлению эквивалентен конденсатору с единичной добротностью. Емкость этого конденсатора равна, как видно из выражений (7) и (8), емкости изолированного электрода длиной Δl . Последнее определяет физический смысл величины Δl , которая, таким образом, может служить мерой эффекта указанного слоя на данном электроде и при данной частоте электрических колебаний.

Получена и построена нормированная ТКП отдельного электрода конечной длины l в виде отношения элемента его матрицы проводимостей y_{11} к модулю его максимальной емкостной проводимости:

$$\frac{y_{11}}{\omega C_1 l} = \frac{\Delta l}{l} \left(\frac{\operatorname{sh} \frac{l}{\Delta l} - \sin \frac{l}{\Delta l}}{\operatorname{ch} \frac{l}{\Delta l} + \cos \frac{l}{\Delta l}} + j \frac{\operatorname{sh} \frac{l}{\Delta l} + \sin \frac{l}{\Delta l}}{\operatorname{ch} \frac{l}{\Delta l} + \cos \frac{l}{\Delta l}} \right). \quad (9)$$

Траектория инвариантна к частоте и конструктивным соотношениям электрода, единственным параметром ее является отношение $\frac{\Delta l}{l}$. При малых величинах $\frac{\Delta l}{l}$ ($\frac{\Delta l}{l} < 0,3$), как видно из (9), нормированную проводимость можно считать равной $\frac{\Delta l}{l}(1+j)$, а ТКП—прямой линией.

В реальной конструкции изолированного емкостного датчика уровня изолированный электрод (чувствительный элемент) помещен внутри неизолированного электрода, служащего одновременно цели механической защиты чувствительного элемента. Датчик будет гибким, если оба электрода будут обладать гибкостью. Для этого неизолированный электрод выполняется из гибкого металлорукава, а чувствительный элемент—из нескольких изолированных стойким диэлектриком металлических тросиков. В качестве последних используются тросики марок СГТФМ, или ПНФД, где диэлектриком служит фторопласт-4Д. Для предотвращения соприкосновения чувствительного элемента с металлорукавом при изгибах необходимы крепления. Их предложено выполнять в виде растяжек из того же тросика, крепящихся на гибком каркасе так, что места их соединений с каркасом чередуются по высоте с местами их соединений с чувствительным элементом. При заданном диаметре металлорукава и минимально допустимом радиусе изгиба вычислена максимально возможная длина l_p свободного отрезка растяжки.

Выпадение осадков на креплениях также приводит к изменению проводимости на клеммах датчика. Сопротивление между концами свободного отрезка растяжки, покрытой проводящим слоем, считается равным $2(z_{11} - z_{12})$ (7), причем мера слоя Δl считается одинаковой для растяжек и чувствительного элемента; сопротивление $z_{кр}$, вносимое одним креплением, определяется выражением

$$z_{кр} = \frac{z_{11} - z_{12}}{2} + \frac{z_{11}}{2N_T}, \quad (10)$$

где N_T —число тросиков, составляющих чувствительный элемент, а в выражениях для z_{11} и z_{12} (7) принимается $l = l_p$.

На основании выражений (7) и (10) построены траектории проводимости креплений для разных значений N_T (2; 4 и 8), а в качестве параметра взято отношение $\frac{\Delta l}{l_p}$.

Наличие электропроводной среды, контактирующей как с землей, так и с проводящим слоем на электроде в месте нижнего крепления, нарушает симметрию креплений, положенную в качестве начального допущения в обоснование справедливости выражения (10). Нарушение симметрии обусловлено наличием токов, текущих от крепления к креплению, которое можно рассматривать как возмущение, убывающее по мере отдаления от уровня к более высоко расположенным креплениям. Если пренебречь этим возмущением, то можно применить принцип суперпозиции и считать проводимость, вносимую наличием слоя на электроде и растяжках, суммой проводимостей на этих элементах, полученных независимо:

$$\frac{N_T}{z_{11}} + \frac{N_{кр}}{z_{кр}}, \quad (11)$$

где $N_{кр}$ —число креплений над поверхностью уровня.

Эта сумма, пронормированная по модулю емкостной проводимости датчика, полностью погруженного в проводящую среду, определяет искомую ТКП при образовании проводящего слоя на изолирующем покрытии электрода датчика и его конструктивных элементах (растяжках).

Форма ТКП в данном случае будет несколько различной при разных диапазонах измерения, поскольку вклад нижнего, электрически несимметричного крепления будет различным при разном полном количестве креплений, пропорциональном диапазону измерения. В равной мере ТКП при разных значениях уровня будут несколько отличаться друг от друга по конфигурации.

На основании выражений (11), (10) и (7) построены ТКП при изменении меры слоя Δl для $N_T = 8$ и диапазонов измерения 1 м и 3 м и для $N_T = 4$ и диапазона 5 м, соответствующие высоте уровня 0 и 50 %.

Показано, что проведенные расчеты по трем изложенным задачам необходимы и достаточны для оптимального выбора частоты измерения, конструкции датчика и определения требований к реакции вторичного прибора. Процедура выбора облегчается тем, что каждая из полученных траекторий инвариантна к частоте, а положение точек на траектории определяется только одним зависящим от частоты параметром ($\text{tg } \delta$ или Δl).

Рассмотрены две конструкции датчика.

Первая—с параметром $x = x_0 = 1,11$ (6), который достигается при достаточно широком расположении тросиков-электродов внутри полости металлорукава.

Вторая—обеспечивающая минимальное заземление проводящего слоя на электроде, параметр x для которой, согласно расчету, равен 1,43.

Для каждой конструкции построены ТКП, соответствующие следующим побочным факторам: солесодержание, температура и проводящий слой на покрытии при условии, что Δl не превышает 7,5 см на частоте 100 кгц, согласно экспериментальным данным, приведенным ниже. Учитывая зависимость Δl и $\text{tg } \delta$ от частоты, делая допущение, что линия одинаковых показаний вторичного прибора — прямая, найдены для частот 10, 100 и 1000 кгц оптимальная величина реакции вторичного прибора и ожидаемое при этой величине реакции максимальное изменение показаний от изменения того или иного побочного фактора в заданных пределах. Указанные расчеты выполнены применительно к следующим контролируемым средам:

Солесодержание мг/л	Тарировочная температура °С
0,3÷1,5	20
0,3÷1,5	245
3÷10	260
3	260÷20
10	260÷20
20÷100	20
100÷40000	20

Результаты сведены в таблицу и по ним сделаны следующие выводы:

1. Задачу первичного преобразования уровня воды высокой очистки (солесодержание менее 10 мг/л) наилучшим образом выполняет датчик с широким расположением тростиков ($\kappa = 1,11$) на частоте 1 мгц. Возможно измерение и на частотах 10 и 100 кгц с несколько большими, но допустимыми температурными погрешностями. Задачу преобразования уровня морской воды (и других электропроводных растворов) такой датчик выполняет удовлетворительно только на высоких (1 мгц) частотах при прямолинейном расположении в объекте контроля и при отсутствии креплений.

2. Датчик с тесным расположением тростиков ($\kappa = 1,43$) удовлетворительно выполняет задачу преобразования уровня воды высокой очистки на частоте 100 кгц, обеспечивая допустимые метрологические характеристики, близкие к характеристикам датчика с оптимальной величиной κ . Датчик с тесным расположением удовлетворительно преобразует уровень электропроводных растворов на частотах 100 кгц и 1 мгц.

3. Преобразование уровня сред, указанных выше, можно выполнить единой конструкцией датчика с тесным расположением на частоте 100 кгц. При этом вторичный прибор должен обладать реакцией, величина которой (от — 0,6

до + 0,2) определена для каждой конкретной измерительной задачи.

Четвертая глава посвящена исследованию преобразовательных свойств колебательных систем фазоёмкостных измерителей комплексных проводимостей. Такими колебательными системами являются линия передачи (в том числе с сосредоточенными элементами) и последовательный колебательный контур. Равновесным состоянием считается такое состояние нагрузки, при котором сигнал, получаемый тем или иным способом, равен нулю.

Применительно к каждой колебательной системе решаются две задачи:

1. Определение связи между активной и реактивной составляющими нагрузки системы в равновесном состоянии, иными словами, нахождение линий нулевого сигнала. Решение этой задачи позволяет определить линии одинаковых показаний вторичного прибора, содержащего такую систему в качестве преобразователя комплексной проводимости в управляющий сигнал.

2. Определение зависимости величины сигнала от реактивной составляющей проводимости нагрузки, или, иными словами, нахождение коэффициента преобразования колебательной системы.

При исследовании преобразовательных свойств линии передачи получены два основных вывода:

1. Использование во вторичном приборе линии передачи с потерями в качестве преобразователя комплексной проводимости в напряжение сообщает прибору отличную от нуля реакцию.

2. Получение требуемой величины реакции (как положительной, так и отрицательной) возможно варьированием параметров тех элементов схемы, которые расположены между точкой съема сигнала и генератором (сюда включается и выходное сопротивление генератора); эти параметры влияют на положение минимума в линии через величины второго порядка малости.

Таким образом, настройка фазоёмкостного прибора на требуемую величину реакции является независимой операцией, не влияющей на остальные метрологические характеристики. Это обстоятельство выгодно отличает фазоёмкостный прибор от вторичных приборов, основанных на других принципах.

Получены инженерные формулы расчета величины реакции и коэффициента преобразования линии передачи при условии, что слежение за минимумом напряжения в линии ведется в непосредственной близости от него. В действительности требования высокой чувствительности вынуждают увеличивать дифференциал сигнала.

Рассмотрены два варианта конечного дифференцирования сигнала:

а) с помощью периодического подключения некоторого конечного импеданса параллельно нагрузке; в этом случае модулируется нагрузка (коэффициент отражения) и, соответственно, ток в цепи генератора;

б) с помощью сравнения напряжений на входе и выходе некоторой конечной ячейки, включенной между генератором и колебательной системой; в этом случае нагрузка и ток постоянны, а модулируется координата точки съема сигнала.

Первый вариант соответствует поисковому слежению за экстремумом, второй—беспоисковому.

Показано, что в **первом варианте** линии нулевого сигнала на плоскости комплексных проводимостей нагрузки являются двумя ветвями гиперболы с ортогональными асимптотами. Таким образом, на плоскости комплексных проводимостей нагрузки имеются в общем случае **три** области: в двух сигнал обладает одинаковым знаком, в третьей—противоположным. Получены полные выражения для координат центра, угла поворота асимптот и фокального параметра гиперболы в зависимости от выходного сопротивления генератора, добротности колебательной системы, величины и добротности подключаемого импеданса.

Получены инженерные формулы расчета коэффициента преобразования, реакции и меры удаления одной ветви гиперболы от другой для различных частных случаев построения схем и проведено сравнение этих случаев.

Так, для одного из частных случаев, когда выходное сопротивление генератора можно считать индуктивностью L_r , колебательная система состоит из соединенной последовательно с нагрузкой катушки индуктивности L с добротностью Q , а добротность подключаемого параллельно нагрузке модуляционного импеданса равна Q_m , реакция p может быть вычислена по приближенной формуле:

$$p \cong -\frac{2}{Q} \left(1 + \frac{L_r}{L} \right) + \frac{1}{Q_m}. \quad (12)$$

При рассмотрении **второго варианта** конечного дифференцирования в качестве подсоединенной ячейки взят конечный импеданс с потерями, а равновесным считается состояние, когда амплитуда напряжения на выходе генератора в k раз больше амплитуды напряжения на входе колебательной системы. Коэффициент асимметрии k может быть больше или меньше единицы.

Показано, что в этом случае линия нулевого сигнала является окружностью. Таким образом, на плоскости комплексных проводимостей нагрузки существуют в общем случае **две** области: знак сигнала в одной противоположен знаку сигнала в другой. Получены полные выражения для координат центра и радиуса окружности в зависимости от величины k , добротности колебательной системы, величины и добротности импеданса подсоединенной ячейки.

Получены инженерные формулы расчета коэффициента преобразования, реакции и диаметра окружности для различных частных случаев построения схем и проведено сравнение этих случаев.

Так, для одного из частных случаев, когда подсоединенная ячейка является катушкой индуктивности L_m , а колебательная система состоит из соединенной последовательно с нагрузкой катушки индуктивности L с добротностью Q , реакция p может быть вычислена по приближенной формуле:

$$p \cong -\frac{L}{QL_m} \cdot \frac{k^2 - 1}{k}. \quad (13)$$

Таким образом, наличие или отсутствие поиска в экстремальном регуляторе фазоёмкостного прибора имеет следствием принципиальное различие в части формы и топологических свойств линий одинаковых показаний. Поисковая схема реализуется меньшим числом элементов, но имеет и меньший диапазон подстройки реакции. Беспойсковая содержит несколько большее число элементов, но с помощью простого изменения асимметрии позволяет в широких пределах варьировать величину реакции.

Пятая глава посвящена анализу следящих систем фазоёмкостных уровнемеров.

Рассмотрены различные способы преобразования механического или электрического воздействия в реактивную проводимость.

Первый основан на линейной (в определенном участке) зависимости индуктивности катушки от положения перемещающегося плунжера. Для линейного преобразования индуктивности в емкость предложен так называемый инверсный преобразователь (пассивный четырехполюсник, элемент матрицы сопротивлений которого z_{11} равен нулю).

Второй основан на обратной корневой зависимости емкости p — n перехода полупроводникового диода от запирающего напряжения. Дан расчет линеаризующего пассивного четырехполюсника, обеспечивающего высокую линейность выходной емкости от напряжения, подаваемого на диод, включенный на вход этого четырехполюсника.

Третий основан на использовании диода в качестве регулируемого вентиля, включенного последовательно с конденсатором постоянной емкости и изменяющего угол отсечки высокочастотного напряжения под воздействием управляющего униполярного напряжения. Показано, что такой вентиль эквивалентен регулируемой емкости, величина которой в широких пределах линейно зависит от управляющего напряжения.

Рассмотрены различные варианты инверсных и линейных преобразователей комплексной проводимости; даны теория и расчет последних, выполненных в виде трансформаторов или T -образных четырехполюсников, определитель матрицы сопротивлений которых равен нулю.

Применение линейных преобразователей дает возможность унифицировать диапазоны изменения проводимости разных датчиков, подключаемых к одному вторичному прибору, позволяет значительно увеличить чувствительность, а также существенно снизить погрешность, вносимую линией связи датчика со вторичным прибором.

Получено уравнение равновесия астатической и статической следящей системы фазомерного уровня в векторной форме в соответствии с принципом многомерного измерения и методом траекторий комплексной проводимости. Показано, что направление векторного коэффициента преобразования вторичного прибора тождественно совпадает с направлением векторного коэффициента преобразования колебательной системы и не зависит от коэффициента усиления в цепи обратной связи и формы годографа вектора проводимости элемента обратной связи от выходного (механического или электрического) сигнала. Эти последние параметры могут влиять только на модуль коэффициента преобразования вторичного прибора.

Иными словами, меняя параметры цепи обратной связи, можно изменить масштаб измерения, но нельзя изменить реакцию, определяемую только параметрами колебательной системы.

Получены передаточные функции звеньев следящей системы фазомерного уровня—элемента обратной связи, а также усилителя низкой частоты и фазового детектора по огибающей низкочастотного напряжения. Показано, что усилительный каскад, фазовый детектор и элемент обратной связи можно считать инерционными звеньями первого порядка при передаче сигнала по огибающей несущего синусоидального напряжения. Получены выражения для коэффициента усиления и постоянной времени этих звеньев.

Рассмотрены вопросы устойчивости следящих систем фазомерных уровнемеров, получены величины предельных коэффициентов усиления и характеристики переходных процессов при малых и больших возмущениях (в линейном и нелинейном режимах).

Рассмотрены методические погрешности фазомерных уровнемеров с учетом минимальных достижимых зависимостей от побочных факторов, определенных в третьей главе применительно к унифицированной конструкции датчика ($\kappa = 1,43$). Проведен анализ методических погрешностей следящей системы, вызванных флуктуациями частоты, напряжения и выходного сопротивления генератора, температуры внутри электронного блока и изменением параметров сетевого напряжения питания. Расчеты проведены применительно к разным типам следящих систем (статической и астатической, поисковой и беспоисковой) и к разным способам управления реактивной проводимостью в цепи обратной связи. Показано, что методическая погрешность фазомерных уровнемеров не превышает 2,5%, а в ряде случаев 1,5% в течение всего срока эксплуатации.

Шестая глава посвящена вопросам синтеза структурных схем фазомерных уровнемеров в зависимости от конкретных измерительных задач на примере разработанных автором и серийно выпускаемых уровнемеров УРВ-3, ФЕУ-1, ФЕУ-Д5 и некоторых новых разработок. Описаны схемы и конструкции указанных уровнемеров, обоснован выбор тех или иных схемных и конструктивных решений.

Даны краткие сведения по техническим, эксплуатационным и метрологическим характеристикам и особенностям настройки фазомерных уровнемеров согласно соответствующим заводским инструкциям, разработанным автором. Специальный раздел главы посвящен тенденциям развития схем и конструкций фазомерных уровнемеров в новых разработках.

В седьмой главе дано описание экспериментов, приведены результаты испытаний и эксплуатации фазомерных уровнемеров.

Эксперименты проводились как на стендах НИИТеплоприбора на стадиях разработки, так и во время приемосдаточных и контрольно-типовых испытаний на заводах-изготовителях—Рязанском заводе тепловых приборов и Смоленском опытном заводе на стадии серийного выпуска.

Результаты настройки, испытаний и эксплуатации нескольких сотен уровнемеров показали соответствие приборов требованиям технических условий, установленных

на основании выводов реферируемой диссертации. Согласно данным журналов, ведущихся персоналом, эксплуатирующим фазоёмкостные уровнемеры, общая продолжительность их наработки в эксплуатационных условиях составила к 1970 году свыше 5 млн. приборо-часов.

Основное внимание в главе уделено экспериментальной проверке зависимостей показаний фазоёмкостных уровнемеров от побочных факторов, рассмотренных в третьей главе.

Зависимость показаний от солесодержания дистиллята в пределах $0,3 \div 1,5$ мг/л при температуре $+20^\circ\text{C}$ определена по результатам приемо-сдаточных испытаний нескольких серийных уровнемеров ФЕУ-1. Обработка результатов испытаний показала, что в среднем они соответствуют расчетам, а их разброс (порядка $0,2\text{—}0,3\%$), согласно методам обработки случайных величин, соответствует статистическому разбросу.

Зависимость показаний от температуры контролируемой среды в пределах от $+20$ до $+260^\circ\text{C}$ проверялась на серийных уровнемерах ФЕУ-Д5 ($\alpha = 1,43$) и УРВ-3 ($\alpha = 1,11$) при разных значениях реакции вторичных приборов и при различных солесодержаниях контролируемой среды ($0,3$; $1,5$; $3,0$ и $10,0$ мг/л). Результаты обрабатывались статистическими методами. Совпадение теоретически и экспериментально полученных величин изменений показаний оказалось в пределах $1,5\%$, что подтвердило правильность расчетов и исходных предположений.

Приведены данные протокола ресурсных испытаний комплекта ФЕУ-Д5 в течение 2000 часов при температуре среды $+260^\circ\text{C}$, подтверждающие сохранение метрологических характеристик уровнемера.

Зависимость показаний фазоёмкостных уровнемеров от выпадения проводящих осадков на чувствительном элементе и конструкционных деталях подвергалась многократной проверке на стадиях разработки и во время контрольно-типовых испытаний.

Экспериментально определена зависимость от времени меры Δl слоя, образующегося на поверхности тросика типа СГТФМ, употребляемого в качестве чувствительного элемента (электрода) датчика. Измерения, проводившиеся в течение 10 тыс. часов на среде „морская вода“ и на частоте 100 кгц, показали, что максимальная величина Δl составляет около $5 \div 6$ см и достигается к $4 \div 5$ тыс. часов. По этим данным была вычислена максимальная толщина слоя (при допущении, что удельная проводимость раствора в слое равна удельной проводимости среды), которая составила 30 мк.

Проверка траектории комплексной проводимости датчика проводилась по двум методикам. Первая предполагает использование одного вторичного прибора и основана на том, что эпюра изменений показаний по высоте уровня за счет образования слоя имеет при каждой величине Δl характерный профиль, вычисляемый из построенных ТКП по известной величине реакции. Показано, что эпюры изменений показаний двух комплектов, построенные по данным протоколов ресурсных (в течение 2000 часов) испытаний уровнемера ФЕУ-1, удовлетворительно совпадают с рассчитанными эпюрами, соответствующими $\Delta l = 4,5$ см, что согласуется с ранее полученной зависимостью Δl от времени.

Вторая методика основана на поочередном подключении одного датчика к двум вторичным приборам, обладающим разными реакциями. Эта методика позволяет экспериментально построить ТКП датчика. Соответствующие испытания, длившиеся 5000 часов, показали:

1. Удаление экспериментально полученных значений комплексных проводимостей от расчетных траекторий не превышает $0,5\%$.

2. Зависимость Δl (как параметра ТКП датчика) от времени удовлетворительно совпадает с аналогичной зависимостью, полученной на отдельном тросике.

Общий вывод, сделанный на основании этих экспериментов: выбранная конструкция датчика и настройка электронного блока на соответствующую величину реакции может обеспечить сохранение метрологических характеристик фазоёмкостного уровнемера морской воды в течение 10 тыс. часов (а возможно, и более длительного срока) без проведения регламентных работ в полости датчика.

В заключении диссертационной работы сформулированы выводы, полученные в результате теоретического исследования и экспериментальной проверки.

1. Предложен и математически описан принцип измерения, основанный на таком совместном преобразовании многих волновых характеристик выходного сигнала датчика, передаваемых по одному каналу связи, в результате которого выделяется информация, используемая не только для определения основной контролируемой величины, но и для компенсации воздействий, имеющих характер помехи.

2. Предложен и математически описан способ построения датчика, вторичного прибора и их настройки, обеспечивающий компенсацию переменного воздействия некоторой помехи. Этот способ реализован в фазоёмкостных уровнемерах путем нахождения траекторий-зависимостей вектора комплексной проводимости датчика от воздей-

ствующих факторов и совмещения этих траекторий с линиями одинаковых показаний вторичного прибора в координатах реактивной и активной составляющих комплексной проводимости на его входных клеммах.

3. Получены траектории-зависимости комплексной проводимости изолированного емкостного датчика уровня воды и водных растворов от изменения уровня контролируемой среды, ее электропроводности и температуры, а также интенсивности слоя проводящих осадков на чувствительном элементе и конструкционных деталях. Найдены оптимальные конструкции датчиков, определены оптимальные частоты и требования к линиям одинаковых показаний вторичного прибора, при которых могут быть получены минимальные погрешности от побочных факторов, предложена методика соответствующих расчетов.

4. Получены линии одинаковых показаний различных систем фазоёмкостных приборов в координатах реактивной и активной составляющих комплексной проводимости. Найдены способы совмещения этих линий с траекториями-зависимостями комплексной проводимости датчика от побочных факторов, позволяющие реализовать возможность достижения минимальных погрешностей от побочных факторов, получены формулы для соответствующих инженерных расчетов.

5. Предложены и исследованы компенсирующие устройства фазоёмкостных уровнемеров, линейные и инверсные преобразователи комплексной проводимости, получены уравнения линеаризации.

6. Получены уравнения равновесия следящих систем фазоёмкостных уровнемеров в векторной форме и показано, что соотношение коэффициентов преобразования реактивной и активной составляющих комплексной проводимости инвариантно к параметрам цепи обратной связи вторичного прибора.

7. Определены критерии устойчивости следящей системы фазоёмкостного уровнемера, найдены уравнения переходных процессов в линейном и нелинейном режимах. Получены передаточные функции усилительных и фазочувствительных звеньев по огибающей синусоидального напряжения.

8. Предложены и исследованы рациональные принципы синтеза структурных схем фазоёмкостных уровнемеров в зависимости от характера измерительной задачи. Разработаны методика расчета фазоёмкостных уровнемеров и рекомендации к их проектированию.

9. Разработаны фазоёмкостные уровнемеры типов УРВ-3, ФЕУ-1 и ФЕУ-Д5, обеспечены их освоение и эксплуатация.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. А. Н. Баташев, Г. Г. Иордан. Физические основы фазоёмкостного метода измерения уровня и принципы построения фазоёмкостных уровнемеров. „Труды института“. Вып. 4, НИИТеплоприбор, М., 1963.

2. А. Н. Баташев. Анализ преобразующего действия линии передачи в фазоёмкостном уровнемере. „Труды института“. Вып. 4, НИИТеплоприбор, М., 1963.

3. А. Н. Баташев. Уравнение равновесия следящей системы фазоёмкостного уровнемера и зависимость выходного сигнала от уровня. „Труды института“. Вып. 1, НИИТеплоприбор, М., 1964.

4. А. Н. Баташев. Анализ зависимостей выходного сигнала фазоёмкостного уровнемера от побочных параметров. „Труды института“. Вып. 1, НИИТеплоприбор, М., 1964.

5. А. Н. Баташев. Методические погрешности следящей системы фазоёмкостного уровнемера. „Труды института“. Вып. 2, НИИТеплоприбор, М., 1964.

6. А. Н. Баташев. Эффект тонкого проводящего слоя на изолирующем покрытии чувствительного элемента изолированного емкостного датчика уровня. „Труды института“. Вып. 3, НИИТеплоприбор, М., 1964.

7. А. Н. Баташев. Передаточные функции усилителя низкой частоты и фазового детектора по огибающей низкочастотного напряжения. „Труды института“. Вып. 3, НИИТеплоприбор, М., 1964.

8. А. Н. Баташев, Г. Г. Иордан, Н. М. Курносов, Б. А. Левинсон, В. П. Тихомиров, А. А. Шелковников. Способ уменьшения погрешностей волновых уровнемеров. Авт. свид. СССР № 203280, кл. 42, 34 от 13.IV.1966 г. „Бюллетень изобретений“ № 20, 1967.

