

6
A-24

А К А Д Е М И Я Н А У К С С С Р
С И Б И Р С К О Е О Т Д Е Л Е Н И Е

Совет секции технических наук Объединенного ученого совета
по физико-математическим и техническим наукам

На правах рукописи

А.И. Новик

Е М К О С Т Н Ы Е С А М О К О М П Е Н С И Р О В А Н Н Ы Е У Р О В Н Е М Е Р Ы

Автореферат диссертации,
представленной на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск
1965

А К А Д Е М И Я Н А У К С С С Р
С И Б И Р С К О Е О Т Д Е Л Е Н И Е

Совет секции технических наук Объединенного ученого совета
по физико-математическим и техническим наукам

На правах рукописи

А.И. Новик

Е М К О С Т Н Ы Е С А М О В О К П Е Н С И Р О В А Н И Е У Р О В Н Е М Е Р Ы

Автореферат диссертации,
представленной на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель -
доктор технических наук
Ф.Б. Гриневич



Новосибирск
1965

Среди современных контрольно-измерительных приборов важное место занимают измерители уровня жидких и сыпучих веществ. В настоящее время известно более десятка различных методов измерения уровня. Емкостные уровнемеры, получившие особенно широкое распространение в последние годы, привлекают к себе внимание высокой универсальностью, простотой схем и конструкций, отсутствием механически перемещающихся элементов в зоне измерения уровня. Датчики емкостных уровнемеров несложны, они, как правило, могут работать при больших давлениях и температурах, а также в высокоагрессивных средах.

Принцип действия емкостного уровнемера несложен. Датчик уровнемера представляет собой конденсатор с удлиненными электродами, помещенными в резервуаре с контролируемым веществом. Комплексная электрическая проводимость датчика зависит от степени погружения электродов в вещество. По величине этой проводимости (в частном случае — емкости) может быть определен уровень. Однако комплексная проводимость датчика зависит не только от уровня, но и от электрических свойств среды, окружающей электроды. Удельная комплексная электропроводимость контролируемых веществ — величина непостоянная, ее значение может меняться в довольно широких пределах под влиянием изменений температуры, влажности, состава и т.п. Поэтому связь проводимости датчика с величиной уровня оказывается неоднозначной, измерение сопровождается значительными погрешностями.

Наряду с этим, значительное влияние на работу емкостного уровнемера может оказывать паразитная емкость соединительного кабеля. Емкость датчика невелика, она составляет, как правило, несколько десятков пикофарад. Очень часто уровнемер не может

быть размещен в непосредственной близости от датчика. Кабель, соединяющий датчик с прибором, может иметь при этом во много раз большую емкость, чем емкость датчика. Очевидно, что изменение незначительных изменений проводимости (емкости) датчика на фоне паразитной емкости кабеля оказывается весьма затруднительным. Нестабильность паразитной емкости кабеля вызывает очень большие погрешности измерения.

Таким образом, несмотря на кажущуюся простоту емкостных уровнемеров, при построении высокоточных приборов возникает ряд весьма сложных метрологических задач. Наибольшие трудности представляет исключение влияния неустойчивости электрических параметров контролируемых веществ и исключение влияния паразитной емкости соединительного кабеля.

Известные способы повышения точности емкостных уровнемеров, как правило, малоэффективны и пригодны лишь для некоторых частных случаев. Отечественной промышленностью до сих пор не выпускаются для широкого пользования емкостные уровнемеры с удовлетворительной компенсацией отмеченных выше погрешностей. Выпускаемые серийно уровнемеры по точности измерения стоят значительно ниже требований, предъявляемых к контрольно-измерительным приборам. Они пригодны, в основном, лишь для грубой оценки уровня и поэтому являются, по существу, не измерителями, а индикаторами уровня. В реальных условиях, в особенности при работе с длинными кабелями, погрешность таких приборов может составлять десятки процентов.

В Институте автоматики и электрометрии СО АН СССР были проведены теоретические и экспериментальные исследования, в результате которых разработаны принципиально новые способы построения емкостных уровнемеров. Основным свойством таких уровнемеров является то, что в силу принципа действия состояние равновесия их схем совсем не зависит от электрических параметров контролируемых веществ, а определяется только геометрическими размерами датчиков и высотой уровня в резервуаре. Так как при этом можно говорить о компенсации погрешностей в самой измерительной схеме, то такие уровнемеры названы нами с а м о к о м п е н с и р о в а н н ы м и [4, II, I4]. Применение самокомпенсированных схем, созданных на базе мостов с тесной индуктивной связью, позволяет существенно облегчить

защиту прибора от паразитных связей, в особенности от влияния емкости соединительного кабеля. Исследования показали, что уравнивание емкостных самокомпенсированных уровнемеров наиболее рационально производить при помощи систем экстремального регулирования [4].

Емкостные самокомпенсированные уровнемеры могут работать при наличии весьма длинных (сотни метров) соединительных кабелей между датчиками и прибором (в известных емкостных уровнемерах увеличение длины кабеля свыше двух-трех десятков метров представляет очень большие трудности). Благодаря этому самокомпенсированные уровнемеры могут быть применены для дистанционного контроля уровня в резервуарах с взрывоопасными и агрессивными веществами, а также для дистанционного многоточечного контроля уровня. Погрешности, обусловленные колебаниями диэлектрической проницаемости и активной проводимости вещества, а также влиянием емкости соединительного кабеля, в самокомпенсированных уровнемерах снижены в десятки раз по сравнению с существующими емкостными уровнемерами.

Диссертационная работа посвящена описанию принципов построения и схем цифровых и аналоговых емкостных самокомпенсированных уровнемеров. Работа содержит 6 глав (212 страниц).

В первой главе, кроме обзорного материала, изложены результаты некоторых исследований, касающихся работы некомпенсированных емкостных уровнемеров. Показано, что погрешности таких приборов, обусловленные влиянием неустойчивости электрических свойств контролируемых веществ и влиянием емкости кабеля, могут составлять в реальных условиях десятки процентов [12]. Рассмотрены некоторые специфические погрешности емкостных уровнемеров, связанные с влиянием волновых процессов в датчике при работе на высоких частотах, а также с влиянием сопротивления электродов датчика [13, 15].

Вторая и третья главы посвящены описанию принципов построения и схем емкостных самокомпенсированных уровнемеров. В четвертой главе рассмотрены чувствительность и погрешности самокомпенсированных уровнемеров, а также взаимосвязь этих величин. В пятой и шестой главах описаны принципы построения цифровых и аналоговых самокомпенсированных уровнемеров, а также разработанные приборы и результаты их испытаний.

I. Необходимым и достаточным условием независимости показаний уровнемера от электрических параметров контролируемых веществ является инвариантность условия равновесия его измерительной схемы по отношению к этим параметрам. Как показали исследования, для построения самокомпенсированных уровнемеров необходимо, чтобы условие равновесия имело следующий вид:

$$q_p Y_p + \sum_{i=1}^{K_B} q_{vi} Y_{vi} + \sum_{i=1}^{K_N} q_{ni} Y_{ni} = 0, \quad (I)$$

где Y_p — проводимость рабочего датчика уровнемера, Y_{vi} и Y_{ni} — проводимости компенсационных датчиков, постоянно погруженных соответственно в верхнюю и нижнюю среду,

q_p, q_v, q_n — действительные коэффициенты, называемые коэффициентами связи соответствующих датчиков,

K_B и K_N — числа верхних и нижних компенсационных датчиков.

Предположим, что каждый датчик представляет собой отрезок однородной по длине линии, причем его поперечные размеры существенно меньше продольных. Если принять, что параметры поперечного сечения однородны для всех датчиков данной измерительной схемы и что электрические свойства каждого из контролируемых веществ однородны по всей массе, то, пренебрегая краевым эффектом, можно выразить проводимости компенсационных датчиков следующим образом:

$$Y_{vi} = Y_v^0 l_{vi}; \quad Y_{ni} = Y_n^0 l_{ni}, \quad (2)$$

где Y_v^0 и Y_n^0 — погонные проводимости датчиков в верхнем и нижнем веществе соответственно,

l_{vi} и l_{ni} — длины соответствующих датчиков.

В работе показано, что проводимость рабочего датчика Y_p может быть представлена тремя способами, определяющими тип измерительной схемы уровнемера. Наиболее наглядным способом является представление величины Y_p в виде суммы проводимостей верхней и нижней частей датчика, находящихся по обе стороны границы

раздела веществ:

$$Y_p = Y_v^0 (l_p - h) + Y_n^0 h, \quad (3)$$

где l_p — длина рабочего датчика, h — измеряемый уровень.

Для компенсации влияния величин Y_v^0 и Y_n^0 при этом необходимы два компенсационных датчика. Подставив (2) и (3) в (I), получим условие равновесия в следующем виде:

$$[q_p (l_p - h) + q_v l_v] + (q_p h + q_n l_n) Y_n^0 = 0. \quad (4)$$

Очевидно, что если коэффициенты при Y_v^0 и Y_n^0 порознь равны нулю, то условие равновесия инвариантно относительно параметров контролируемых веществ. Из (4) видно, что при этом должны соблюдаться следующие соотношения:

$$-q_p h = q_n l_n; \quad -q_p l_p = q_v l_v + q_n l_n.$$

Если уравнивание схемы производить регулированием коэффициента q_n , то обеспечивается линейная зависимость между регулируемым параметром и уровнем h . При этом необходимо одновременно изменять и коэффициент q_v , чтобы сумма $q_v l_v + q_n l_n$ оставалась неизменной. В связи с такой одновременной регулировкой двух коэффициентов связи в разных направлениях схемы, построенные по описанному способу, названы схемами встречной регулировкой двух параметров [14].

Можно представить величину Y_p в виде суммы двух других проводимостей, одна из которых соответствует полному погружению датчика в верхнюю среду, а вторая выражает пропорциональное уровню h приращение проводимости за счет разницы величин Y_v^0 и Y_n^0 :

$$Y_p = Y_v^0 l_p + (Y_n^0 - Y_v^0) h. \quad (5)$$

Как видно из (5), для компенсации влияния величин Y_v^0 и Y_n^0

В этом случае необходимо три компенсационных датчика, два из которых расположены в верхней среде и один - в нижней. Подставляя (2) и (5) в (1), получим:

$$(q_p l_p - q_p h + q_{s1} l_{s1} + q_{s2} l_{s2}) Y_s^0 + (q_p h + q_n l_n) Y_n^0 = 0. \quad (6)$$

Инвариантность (6) относительно электрических параметров верхнего и нижнего вещества может быть обеспечена, если коэффициенты при Y_s^0 и Y_n^0 имеют нулевые значения:

$$q_p l_p - q_p h + q_{s1} l_{s1} + q_{s2} l_{s2} = 0, \quad (7)$$

$$q_p h + q_n l_n = 0. \quad (8)$$

Из (8) следует, что наиболее удобно уравнивать схему изменением величины коэффициента q_n , при этом обеспечивается линейная шкала отсчета уровня. Выполнение условия (7) при изменении уровня h лучше всего обеспечивать регулировкой коэффициента связи одного из верхних датчиков, например, изменением q_{s2} . Разобьем (7) на два равенства:

$$q_p l_p + q_{s1} l_{s1} = 0; \quad -q_p h + q_{s2} l_{s2} = 0.$$

Первое из них выражает необходимое соотношение между длинами датчиков l_p , l_{s1} и постоянными коэффициентами q_p и q_{s1} . Из второго следует, что коэффициент q_{s2} должен изменяться пропорционально уровню h и, следовательно, пропорционально величине q_n . В частности, при $l_{s2} = l_n$ абсолютные значения коэффициентов равны: $|q_{s2}| = |q_n|$. Поэтому уравнивание может быть весьма просто сведено к регулированию одного параметра. Схемы, построенные по описанному способу, названы схемами с согласной регулировкой параметров с двойной верхней компенсацией [14].

Величина Y_p может быть представлена и в виде разности проводимости рабочего датчика, погруженного целиком в нижнее вещество, и приращения проводимости за счет разницы между Y_n^0 и Y_s^0 :

$$Y_p = Y_n^0 l_p - (Y_n^0 - Y_s^0) (l_p - h). \quad (9)$$

При этом способе представления Y_p для компенсации влияния Y_s^0 и Y_n^0 нужны также три компенсационных датчика, два из которых расположены в нижней среде, а один - в верхней. Подставив (2) и (9) в (1), получим:

$$[q_p (l_p - h) + q_s l_s] Y_s^0 + [q_p l_p - q_p (l_p - h) + q_{n1} l_{n1} + q_{n2} l_{n2}] Y_n^0 = 0. \quad (10)$$

Условиями инвариантности (10) относительно Y_s^0 и Y_n^0 являются следующие соотношения, получаемые аналогично (7) и (8):

$$q_p (l_p - h) + q_s l_s = 0; \quad q_p l_p + q_{n1} l_{n1} = 0; \quad -q_p (l_p - h) + q_{n2} l_{n2} = 0.$$

Из этих соотношений видно, что при уравнивании схемы регулировкой величины q_s получается линейная связь между уравнивающим параметром и величиной $l_p - h$. Градуировкой шкалы прибора в противоположном обычному направлении может быть обеспечен прямой и линейный отсчет уровня h . Коэффициент q_{n2} должен изменяться пропорционально коэффициенту q_s , при $l_{n2} = l_s$ $|q_{n2}| = |q_s|$. Как и в предыдущем случае, уравнивание может быть сведено к регулированию одного параметра. Схемы, построенные по данному способу, названы схемами с согласной регулировкой параметров с двойной нижней компенсацией [14].

Особое место занимают измерительные схемы емкостных уровней с экранировкой погруженной части датчика [9, II], которые могут рассматриваться как частный случай схем с встречной регулировкой. Эти схемы пригодны, в основном, для измерения уровня проводящих сред, когда выше границы раздела находится вещество со стабильными электрическими параметрами (например, воздух или другой газ). Принцип действия таких приборов заключается в том, что путем специального подключения датчика к соответствующей измерительной схеме достигается электростатическая экранировка погруженной части электродов датчика, в результате чего проводимость погру-

венной части практически равна нулю. По мере увеличения уровня емкость датчика изменяется от своего максимального значения, соответствующего пустому резервуару, до нуля. Преимуществом схем с экранировкой датчика заключается в том, что они позволяют исключить влияние параметров контролируемого вещества на показания прибора без применения компенсационных датчиков, а также дают принципиальную возможность исключения или уменьшения погрешности от неоднородности параметров вещества по объему. При рациональном выборе параметров и конструкции датчика схемы с экранировкой могут быть использованы для измерения уровня не только электропроводных, но и неэлектропроводных веществ с высоким значением диэлектрической проницаемости ϵ .

II. Как показали исследования, для построения емкостных самокомпенсированных уровнемеров наилучшим образом подходят мостовые схемы с тесной индуктивной связью. Условия равновесия таких схем в общем виде записываются следующими формулами:

$$\sum_i n_i Y_i = 0, \quad \sum_i m_i n_i Y_i = 0, \quad (II)$$

где Y_i — проводимости, включенные в ветви схемы, m_i и n_i — числа витков индуктивных плеч сравнения напряжений и токов.

Легко заметить, что выражения (II) по своей структуре идентичны с условием равновесия (I) измерительных схем самокомпенсированных уровнемеров. При этом роль коэффициентов связи q_i выполняют числа витков n_i или произведения $m_i n_i$, а необходимые знаки коэффициентов могут быть обеспечены соответствующим направлением включения обмоток индуктивных плеч.

В работе предложено и описано 12 измерительных схем самокомпенсированных уровнемеров, среди которых схемы с встречной регулировкой, схемы с согласной регулировкой с двойной верхней и двойной нижней компенсацией, схемы с экранировкой погруженной части датчика. Среди предложенных схем с встречной регулировкой наиболее характерной является измерительная схема, представляющая собой шестиплечий емкостно-индуктивный мост, в плечи которого включены рабочий и компенсационные датчики [1, 2].

Между обмотками индуктивных плеч этого моста обеспечена тесная индуктивная связь с коэффициентом, близким к единице. Уравновешивание схемы осуществляется одновременным регулированием числа витков обмоток, связанных с обоими компенсационными датчиками. Число витков индуктивного плеча, включенного последовательно с нижним компенсационным датчиком, линейно связано с измеряемым уровнем. При этом на результат измерения не влияют электрические параметры верхнего и нижнего контролируемых веществ.

Недостатком схем с встречной регулировкой является необходимость одновременного регулирования числа витков двух плеч. В тех случаях, когда верхняя среда имеет стабильные электрические параметры (воздух, газ и др.), для построения самокомпенсированных уровнемеров могут быть использованы измерительные схемы с согласной регулировкой с двойной верхней компенсацией. При этом в схему вводятся только рабочий и нижний компенсационный датчики, а верхние компенсационные датчики заменяются двумя образцовыми конденсаторами. Уравновешивание схем с согласной регулировкой осуществляется изменением числа витков одного плеча в ветви сравнения токов либо в ветви сравнения напряжений. При втором способе уравновешивания чувствительности схемы по диапазону измерения более равномерна.

Если электрические параметры верхней среды нестабильны, а нижней — стабильны, то наилучшие результаты дает применение измерительных схем с согласной регулировкой с двойной нижней компенсацией. Построение их аналогично описанному выше.

Измерительные схемы с экранировкой датчика представляют собой четырехплечные мосты с тесной индуктивной связью. Обязательным условием их нормальной работы является надежное электрическое соединение контролируемой среды с землей и с экраном схемы.

Независимость показаний уровнемера от паразитных связей может быть достигнута путем совершенной защиты измерительной схемы [1, 2, II]. Методы защиты мостов переменного тока известны. Однако осуществление эффективной защиты емкостных самокомпенсированных уровнемеров от влияния паразитных связей, главным образом — емкости соединительных кабелей, имеет специфические особенности и связано со значительными трудностями.

Это объясняется очень большими величинами паразитных проводимостей, а также значительным удалением датчиков от остальных элементов измерительной схемы. Применение мостовых схем с тесной индуктивной связью облегчает осуществление эффективной защиты емкостных самокомпенсированных уровнемеров. Практически в разработанных схемах влияние паразитных проводимостей кабелей снижено в десятки и сотни раз по сравнению с известными емкостными уровнемерами, а во многих случаях сведено к пренебрежимо малой величине. Благодаря этому оказалось возможным вынесение датчиков на расстояния в сотни метров от измерительной схемы при очень малых дополнительных погрешностях.

III. Общие уравнения, описывающие измерительные схемы самокомпенсированных уровнемеров, могут быть приведены к виду:

$$\Phi(\xi_1, \xi_2, \dots) = Q(\xi_1, \xi_2, \dots) \cdot H(\xi_1, \xi_2, \dots) = 0,$$

где ξ_i - любой параметр схемы.

Сомножитель Q ни при каких конечных значениях параметров не равен нулю, а сомножитель H равен нулю в момент равновесия схемы, то есть равенство $H=0$ является условием равновесия измерительной схемы. Чувствительность самокомпенсированных уровнемеров при этом определяется по формуле:

$$S_{\xi_i} = Q(\xi_1, \xi_2, \dots) \cdot \frac{\partial H}{\partial \xi_i}, \quad (12)$$

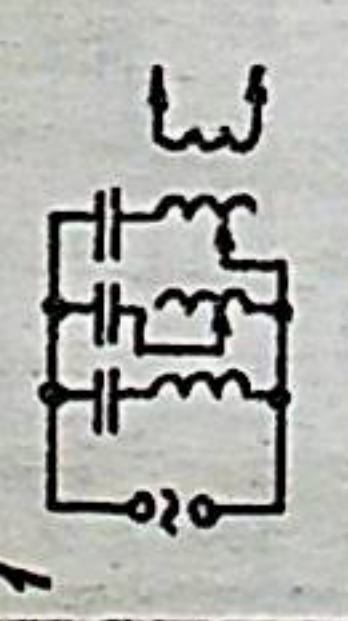
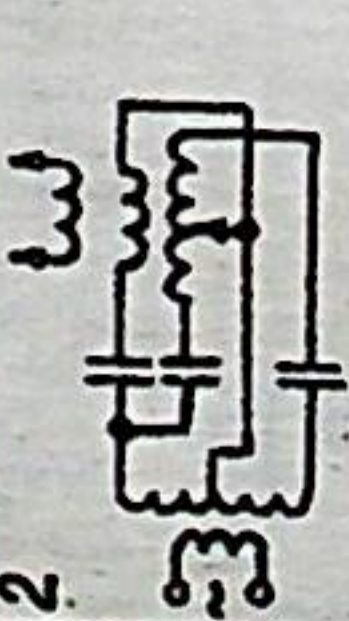
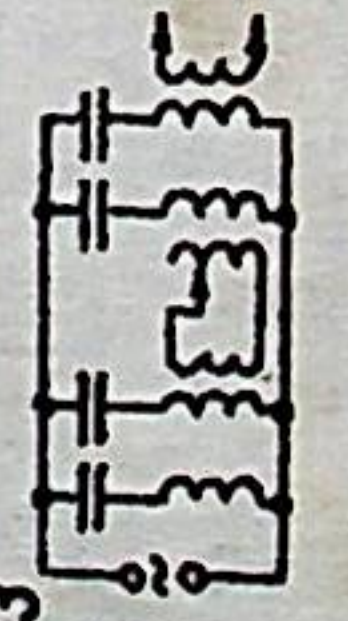
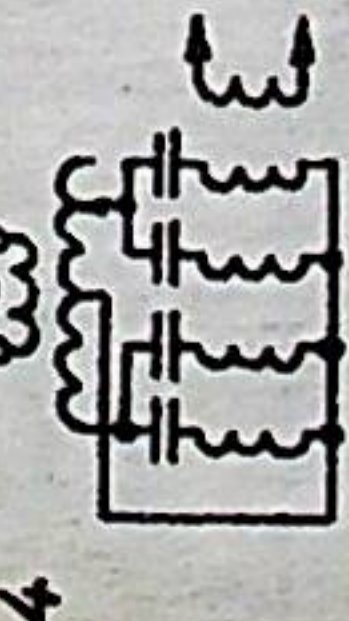


где S_{ξ_i} - чувствительность по параметру ξ_i

Пользуясь формулой (12), можно показать, что приведенные чувствительности схемы по уровню h и по регулируемому числу витков n равны по величине, но имеют противоположные знаки:

$$S_h^n = -S_n^n.$$

Поэтому достаточно вычислять чувствительность по одному из этих параметров.

В работе вычислены чувствительности предложенных измери-

№ и вид схемы	Рез. пар.	Удельная приведенная чувствительность $S_{n(m)}^n = -S_h^n$.
1 	n_3	$\frac{n_{\text{вых}} n_1 C_{\text{оп}} (\epsilon_H - \epsilon_B)}{C_{\text{оп}} [\epsilon_B + h_2 (\epsilon_H - \epsilon_B)] n_1^2 + C_{\text{об}} \epsilon_B (n_1 \frac{L_1}{l_0} - n_3 \frac{L_1}{l_0})^2 + C_{\text{он}} \epsilon_H n_3^2 - \frac{1}{d^2} \omega^2}$
2 	n_3	$\frac{n_{\text{вых}} m_1 n_1 C_{\text{оп}} (\epsilon_H - \epsilon_B)}{m_1 C_{\text{оп}} [\epsilon_B + h_2 (\epsilon_H - \epsilon_B)] n_1^2 + C_{\text{об}} \epsilon_B (m_1 \frac{L_1}{l_0} - n_3)^2 + C_{\text{он}} \epsilon_H n_3^2 - \frac{1}{d^2} \omega^2}$
3 	n_3	$\frac{n_{\text{вых}} n_1 C_{\text{оп}} (\epsilon_H - \epsilon_B)}{C_{\text{оп}} [\epsilon_B + h_2 (\epsilon_H - \epsilon_B)] n_1^2 + C_{\text{об}} \epsilon_B n_1^2 + \frac{n_3^2}{n_4^2} (C_{\text{об}2} \epsilon_B n_3^2 + C_{\text{он}} \epsilon_H n_3^2) - \frac{1}{\omega^2} (\frac{1}{d_1^2} + \frac{n_3^2}{n_4^2} d_2^2)}$
4 	m_2	$\frac{n_{\text{вых}} m_1 n_1 C_{\text{оп}} (\epsilon_H - \epsilon_B)}{m_1 C_{\text{оп}} [\epsilon_B + h_2 (\epsilon_H - \epsilon_B)] n_1^2 + C_{\text{об}1} \epsilon_B n_2^2 + C_{\text{об}2} \epsilon_B n_3^2 + C_{\text{он}} \epsilon_H n_4^2 - \frac{1}{d^2} \omega^2}$
5 	m_2	$\frac{n_{\text{вых}} m_1 n_1 C_{\text{оп}} (\epsilon_H - \epsilon_B)}{m_1 C_{\text{оп}} [\epsilon_B + h_2 (\epsilon_H - \epsilon_B)] n_1^2 + C_{\text{об}1} \epsilon_B n_2^2 + C_{\text{об}2} \epsilon_B n_3^2 + C_{\text{он}} \epsilon_H n_4^2 - \frac{1}{d^2} \omega^2}$
6 	n_2	$\frac{n_{\text{вых}} m_1 n_1 C_{\text{оп}} (\epsilon_H - \epsilon_B)}{m_1 C_{\text{оп}} [\epsilon_B + h_2 (\epsilon_H - \epsilon_B)] n_1^2 + C_{\text{об}1} \epsilon_B n_1^2 + C_{\text{об}2} \epsilon_B n_2^2 + C_{\text{он}} \epsilon_H n_2^2 - \frac{1}{d^2} \omega^2}$

№ и вид схемы	Рез. пар.	Удельная приведенная чувствительность $S_{n(m)}^n = -S_n^n$
7	n_3	$\frac{n_{\text{вых}} n_1 C_{\text{оп}} (\epsilon_H - \epsilon_B)}{C_{\text{оп}} [\epsilon_H + (n_2 - 1)(\epsilon_H - \epsilon_B)] n_1^2 + C_{\text{оп}} \epsilon_H n_2^2 + C_{\text{об}} \epsilon_H n_5^2 + C_{\text{об}} \epsilon_B n_6^2} - \frac{1}{\omega^2} \left(\frac{1}{d_1^2} + \frac{n_3^2}{n_2 d_2^2} \right)$
8	n_2	$\frac{n_{\text{вых}} n_1 n_2 C_{\text{оп}} (\epsilon_H - \epsilon_B)}{n_1 C_{\text{оп}} [\epsilon_H + (n_2 - 1)(\epsilon_H - \epsilon_B)] n_1^2 + C_{\text{оп}} \epsilon_H n_1^2 + C_{\text{об}} \epsilon_B n_2^2 + C_{\text{оп}} \epsilon_H n_2^2} - \frac{1}{d_2^2 \omega^2}$
9	n_2	$\frac{n_{\text{вых}} n_1 C_{\text{оп}}}{C_{\text{оп}} (1 - n_2) n_1^2 + C_{\text{об}} n_2^2} - \frac{1}{d^2 \omega^2}$
10	m_3	$\frac{n_1 C_{\text{оп}} (\epsilon_H - \epsilon_B)}{m_1 C_{\text{оп}} [\epsilon_B + n_2 (\epsilon_H - \epsilon_B)] + C_{\text{об}} \epsilon_B + C_{\text{оп}} \epsilon_H + C_{\text{п}}}$
11	m_3	$\frac{n_1 C_{\text{оп}} (\epsilon_H - \epsilon_B)}{m_1 C_{\text{оп}} [\epsilon_B + n_2 (\epsilon_H - \epsilon_B)] + C_{\text{об}} \epsilon_B + C_{\text{об}} \epsilon_H + C_{\text{оп}} \epsilon_H + C_{\text{п}}}$
12	n_2	$\frac{n_1 C_{\text{оп}}}{m_1 C_{\text{оп}} (1 - n_2) + C_{\text{об}} + C_{\text{п}}}$

тельных схем самокомпенсированных уровнемеров. Результаты вычислений приведены в таблице [№]. В формулах приняты следующие обозначения:

- n_1, n_2, \dots - числа витков индуктивных плеч сравнения токов,
- m_1, m_2, \dots - числа витков индуктивных плеч сравнения напряжений,
- $m_1, n_{\text{вых}}$ - числа витков генераторной и выходной обмоток,
- n_2 - относительная величина измеряемого уровня,
- ϵ_B и ϵ_H - относительные диэлектрические проницаемости верхнего и нижнего вещества,
- $C_{\text{оп}}, C_{\text{об}}, C_{\text{оп}}$ - начальные емкости датчиков,
- $C_{\text{об}}^p$ - емкость образцового конденсатора,
- $C_{\text{п}}$ - паразитная емкость, шунтирующая выход схемы,
- l_p, l_B, l_H - длины датчиков,
- ω - рабочая частота,
- d, d_1, d_2 - постоянные величины, определяемые параметрами сердечников индуктивных плеч.

Важным параметром для емкостных самокомпенсированных уровнемеров, как и для других автоматических приборов, является постоянство чувствительности измерительной схемы по диапазону измерения. Неравномерность величины S_n^n в диапазоне измерения, как видно из таблицы, обуславливается исключительно непостоянством знаменателя множителя Q . В работе проведен анализ равномерности чувствительности для предложенных схем. Показано, что для схем с суммированием токов на индуктивно-связанных плечах (схемы 1 - 9) возможны два режима работы - дорезонансный и зарезонансный. В дорезонансном режиме чувствительность наиболее равномерна по диапазону для большинства таких схем (исключение составляют схемы 3 и 7), однако она сильно зависит от изменений частоты и параметров сердечника. В зарезонансном режиме, наоборот, частота и параметры сердечника практически не влияют на изменения чувствительности, однако при изменении регулируемого параметра могут наблюдаться значительные колеба-

[№] Схемы 3 и 7, а также 6 и 8 одинаковы по начертанию, но различны по типу компенсации (3 и 6 - с двойной верхней, а 7 и 8 - с двойной нижней компенсацией).

ния величины S_n^n .

IV. В работе получено общее выражение предельной приведенной погрешности β_h^n емкостных самокомпенсированных уровнемеров:

$$\beta_h^n = \left| \frac{1}{h_{\max} H'_h} \sum_{i=1}^K H'_{\xi_i} \Delta \xi_i \right| + \left| \frac{U_0}{U_r S_h^n} \right|, \quad (13)$$

где H'_h, H'_{ξ_i} - производные от условия равновесия по соответствующему параметру,
 $\Delta \xi_i$ - абсолютное изменение параметра,
 U_0 - абсолютная погрешность приведения к нулю выходного напряжения,
 U_r - напряжение генератора.

Пользуясь общим выражением (13), можно определить погрешности, вызываемые различными факторами (нестабильностью параметров датчиков и измерительной схемы, влиянием паразитных связей, неравномерностью свойств среды по объему и др.).

В качестве примера приведем выражение погрешности β_h^n для схемы с встречной регулировкой при измерении уровня раздела газ - вещество с диэлектрической проницаемостью ϵ_0 :

$$\beta_h^n = \frac{1}{\epsilon_0 - 1} \left| \frac{\epsilon_0 h_z^2 \delta}{2} + \frac{\Delta C_{рп}}{C_{ор}} - (1 - h_z) \left(\frac{\Delta \epsilon_0}{\epsilon_0} + \frac{\Delta C_{ор}}{C_{ор}} \right) - h_z \left(\frac{\Delta \epsilon_n \epsilon_0}{\epsilon_n} + \frac{\Delta C_{нп}}{C_{он}} \right) \right| + \left| \frac{U_0 n_1 \left[1 + h_z (\epsilon_0 - 1) + \frac{\rho_p}{\epsilon_0} (1 - h_z^2) + \frac{\rho_p}{\epsilon_n} \epsilon_0 h_z^2 - \frac{1}{C_{ор} n_1^2 d^2 \omega^2} \right]}{U_r n_{\text{вых}} (\epsilon_0 - 1)} \right|$$

Здесь: δ - относительная величина градиента ϵ по высоте,
 $\Delta C_{рп}, \Delta C_{вп}, \Delta C_{нп}$ - паразитные емкости, шунтирующие соответствующие датчики,
 $\Delta \epsilon_0, \Delta \epsilon_n$ - абсолютные отклонения длин верхнего и нижнего датчиков от расчетных.

Особый интерес представляет определение влияния емкостей соединительных кабелей на погрешность измерения. Расчет показывает, что возможно создание схем, в которых изменение длины кабеля от нуля до 100 м не вызывает практически дополнительной погрешности, и лишь при увеличении длины кабеля до 400-500 м (паразитная емкость около 20 000-30 000 пф) приводит к появлению дополнительной погрешности, не превышающей одного процента. Экспериментальная проверка подтверждает эти данные.

В общем случае, при нестабильных параметрах контролируемых веществ, при наличии активной проводимости у этих веществ и при значительной длине кабелей погрешности самокомпенсированных уровнемеров в десятки раз меньше погрешностей некомпенсированных или частично компенсированных емкостных уровнемеров.

V. Переход на дискретное уравнивание и цифровой отсчет в емкостных уровнемерах, кроме общеизвестных преимуществ цифровых приборов, дает возможность легко осуществлять самокомпенсированные схемы с использованием мостов с тесной индуктивной связью, уравниваемых посредством коммутации витков. Исследования показывают, что для цифровых уровнемеров в связи со спецификой их работы наиболее пригодным оказывается режим следящего уравнивания. Высокая помехоустойчивость, исключение влияния колебаний чувствительности схемы и паразитных фазовых сдвигов выходного напряжения, устойчивый цифровой отсчет при минимальной погрешности от дискретности обеспечиваются при построении системы уравнивания цифрового уровнемера на основе принципов экстремального регулирования [4, 5]. Анализ показывает, что из различных видов параметрической модуляции наилучшие результаты в цифровых уровнемерах дает импульсная модуляция регулируемого числа витков [5, 7]. В качестве уравнивающих элементов в цифровых уровнемерах используются двоично-десятичные счетчики импульсов [5, 8]. Для установления взаимно-однозначного соответствия между числом сосчитанных импульсов и состоянием измерительной схемы реверсивный счетчик связывается с измерительными индуктивными тетрадами [4, 5], входящими в регулируемое плечо мостовой схемы. Переключение секций тетрады осуществляется с помощью контактных или бесконтактных коммутирующих элементов. Для модуляции числа витков

используется модулятор, представляющий собой простейший бесконтактный коммутатор на три положения [5-8]. Управление модулятором производится с помощью специального импульсного устройства [3, 5, 8]. Состояние реверсивного счетчика после уравновешивания схемы определяется с помощью дешифратора и цифрового отсчетного устройства [5, 8], показывающего результат измерения уровня в виде десятичного числа.

В работе описаны три цифровых экстремальных уровнемера, разработанных на основе изложенных принципов. Первый из них [1, 2, 6], предназначенный для измерения уровня раздела двух веществ с нестабильными параметрами, построен на основе измерительной схемы с встречной регулировкой. Как показали испытания, проведенные на заводе "Физприбор" (г. Фрунзе), погрешность измерения уровня (без учета погрешности изготовления датчиков) составляет $\pm 0,7\%$, допустимая длина соединительных кабелей - до 50-70 м. Дополнительная погрешность при изменении диэлектрической проницаемости контролируемых веществ от 1,5 до 9 практически равна нулю. Максимальное время уравновешивания 1,5 сек.

Второй емкостный экстремальный цифровой уровнемер построен на основе измерительной схемы с согласной регулировкой с двойной верхней компенсацией и предназначен преимущественно для измерения уровня раздела газ - вещество. В измерительную схему прибора и его уравновешивающее устройство введено ряд усовершенствований, позволивших уменьшить габариты и вес прибора, повысить надежность его работы. Технические характеристики уровнемера аналогичны предыдущему, за исключением максимальной-допустимой длины соединительных кабелей, достигающей для данного прибора величины 200-250 м. Испытания макета прибора показали, что при изменении длины кабеля от нуля до 200-250 м возникает дополнительная погрешность около 0,4%.

Третий из разработанных приборов также имеет измерительную схему с согласной регулировкой. Однако его схема существенно усовершенствована. В нее введен дополнительный трансформатор с тесной индуктивной связью между обмотками, подключенный к младшей индуктивной тетраде и модулятору. Благодаря этому существенно уменьшено эквивалентное активное сопротивление регулируемого плеча, что позволило обеспечить работу прибора

с весьма длинными кабелями. Дополнительная погрешность от влияния кабеля длиной до 100 м пренебрежимо мала. При изменении длины кабеля от нуля до 400-500 м возникает погрешность не более 0,5-0,8%. Этот прибор с демонстрационным резервуаром представлен для экспонирования на Выставке достижений народного хозяйства СССР.

VI. Использование цифровых уровнемеров, являющихся более высокоточными, но вместе с тем и более дорогими и сложными приборами, не всегда целесообразно. В ряде случаев могут быть применены аналоговые самокомпенсированные уровнемеры, которые значительно проще и дешевле цифровых.

В аналоговых самокомпенсированных уровнемерах могут использоваться в принципе те же измерительные схемы, что и в цифровых. Уравновешивание многих из этих схем может производиться не только изменением количества витков, но и регулировкой напряжения, приложенного к одной из ветвей схемы. Существенным при этом является то, что отсчет уровня может быть осуществлен не по величине регулируемого параметра, а по величине регулируемого напряжения. В связи с этим представляется возможным построение самокомпенсированных аналоговых уровнемеров с чисто электрическим уравновешиванием, которое производится управлением нелинейными элементами или посредством подачи усиленного выходного сигнала в ветвь уравновешивания схемы.

В работе получены формулы, описывающие работу аналоговых самокомпенсированных уровнемеров с электрическим уравновешиванием.

Предложенные аналоговые уровнемеры с непосредственным уравновешиванием по точности и по эффективности защиты уступают цифровым, однако являются исключительно простыми приборами. В работе описаны также схемы более совершенных аналоговых уровнемеров с двойным преобразованием сигнала неравновесия и с модуляцией уравновешивающего напряжения (экстремальные). Показано, что применение экстремального регулирования не приводит к существенному усложнению приборов, однако позволяет создать весьма совершенные аналоговые уровнемеры.

На основании схемы с прямым уравновешиванием разработан аналоговый самокомпенсированный уровнемер, предназначенный для

измерения уровня диэлектриков с величиной ϵ , весьма близкой к единице (1,2-1,6), что, как известно, представляет очень большие трудности. Полная приведенная погрешность уровнемера при изменении ϵ в пределах 1,2-2,0 и при изменении длины соединительного кабеля от 3 до 12 м не превышает 2,5%. В реальных условиях, при постоянной длине кабеля эта погрешность может быть снижена. Заметим, что погрешность некомпенсированного уровнемера в аналогичных условиях составила бы сотни процентов - измерение было бы невозможным. Разработанный прибор прошел лабораторные и заводские испытания и передан на завод "Физприбор" для серийного производства. Материалы по аналогичным самокомпенсированным уровнемерам переданы также в ГКТБ Совнархоза Узбекской ССР (г.Ташкент) для разработки различных модификаций серийных приборов.

УП. В ы в о д ы. Основные результаты работы сводятся к следующему:

1. Предложены и разработаны принципы построения измерительных схем емкостных самокомпенсированных уровнемеров.

2. На основе предложенных принципов разработаны:

а) измерительные схемы цифровых уровнемеров с встречной регулировкой, позволяющие с минимальным числом датчиков обеспечить полную компенсацию параметров контролируемых веществ при измерении уровня раздела двух сред;

б) измерительные схемы цифровых уровнемеров с согласной регулировкой, для уравнивания которых требуется минимальное количество коммутирующих элементов;

в) измерительные схемы с экранировкой датчика, позволяющие исключить влияние нестабильности параметров контролируемого вещества без применения компенсационных датчиков;

г) измерительные схемы и уравнивающие устройства самокомпенсированных аналоговых уровнемеров с электрическим бесконтактным уравниванием.

3. Рассмотрены вопросы защиты измерительных схем самокомпенсированных уровнемеров. Показано, что в них может быть достигнута эффективная защита от влияния паразитных проводимостей, в том числе, от влияния емкости соединительных кабелей.

4. Исследованы чувствительность и погрешности самокомпен-

сированных уровнемеров, а также взаимосвязь этих величин. Проведен анализ равномерности чувствительности по диапазону измерения.

5. Разработаны схемы уравнивающих устройств для цифровых самокомпенсированных уровнемеров, основанные на применении экстремального регулирования и параметрической модуляции. Использование таких схем позволяет исключить влияние фазовых искажений сигнала неравновесия на точность измерения уровня, а также обеспечить высокую устойчивость работы устройств при значительных колебаниях чувствительности схемы. Погрешность измерения при этом минимальна и составляет половину шага уравнивания.

6. Разработаны схемы уравнивания аналоговых самокомпенсированных уровнемеров. Показано, что наилучшие результаты при построении аналоговых уровнемеров получаются при использовании методов экстремального регулирования.

7. Разработаны, изготовлены и экспериментально проверены емкостные самокомпенсированные уровнемеры:

а) цифровой уровнемер с встречной регулировкой,

б) цифровой уровнемер с согласной регулировкой,

в) цифровой уровнемер с повышенной эффективностью защиты от влияния паразитных емкостей для работы с длинными кабелями,

г) аналоговый самокомпенсированный уровнемер для измерения уровня диэлектриков с низким значением диэлектрической проницаемости ($\epsilon = 1,2 - 1,6$).

8. Материалы исследований по разработке самокомпенсированных уровнемеров переданы для внедрения на завод "Физприбор" (г.Фрунзе), в ГКТБ (г.Ташкент) и в некоторые другие организации.

По теме диссертации автором опубликованы следующие работы:

1. О построении емкостных уровнемеров (в соавторстве с К.Б.Карандеевым и Ф.Б.Гриневичем). Измерительная техника, 1961, № 10.

2. Емкостный уровнемер (в соавторстве с К.Б.Карандеевым и Ф.Б.Гриневичем). Авторское свидетельство № 146521, приоритет от 19.05.61 г.

3. Спусковое устройство с тремя устойчивыми состояниями (в соавторстве с А.В.Чеботаревым). Авторское свидетельство № 163420, приоритет от 2.08.62 г.

4. О построении цифровых самокомпенсированных уровнемеров (в соавторстве с Ф.Б.Гриневичем и А.В.Чеботаревым). Автоматический контроль и методы электрических измерений. Труды всесоюзной конференции 1962 г. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1964.

5. Элементы и схемы цифровых экстремальных мостов переменного тока (в соавторстве с Ф.Б.Гриневичем и А.В.Чеботаревым). Монография. Фрунзе, Изд-во АН Кирг.ССР, 1963.

6. Цифровой емкостный уровнемер (в соавторстве с Ф.Б.Гриневичем и А.В.Чеботаревым). Авторское свидетельство по заявке № 849323/26-10, приоритет от 27.07.63 г. (решение о выдаче от 13.03.65 г.).

7. Цифровой автоматический экстремальный мост переменного тока (в соавторстве с Ф.Б.Гриневичем и А.В.Чеботаревым). Авторское свидетельство по заявке № 862180/26-10, приоритет от 21.10.63 г. (решение о выдаче от 9.03.65 г.).

8. Элементы цифровых экстремальных мостов переменного тока (в соавторстве с Ф.Б.Гриневичем и А.В.Чеботаревым). Тезисы конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1963.

9. Емкостный уровнемер для электропроводных жидкостей (в соавторстве с Ф.Б.Гриневичем). Авторское свидетельство по заявке № 886474/26-10, приоритет от 9.03.64 г. (решение о выдаче от 13.03.65 г.).

10. Экстремум-детектор для емкостного самокомпенсированного уровнемера (в соавторстве с Ф.Б.Гриневичем и А.В.Чеботаревым). Электрические методы автоматического контроля. Труды ИАЭ СО АН СССР, № 9, Новосибирск, 1964.

11. Схемы емкостных самокомпенсированных уровнемеров (в соавторстве с Ф.Б.Гриневичем). Там же.

12. О погрешностях простейших емкостных уровнемеров. Тезисы конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1964.

13. Об одном способе измерения уровня проводящих веществ (в соавторстве с Ф.Б.Гриневичем). Датчики и схемы влагомеров

и уровнемеров для нефтехимической промышленности. Сборник трудов ИА АН Кирг.ССР и ИАЭ СО АН СССР, Фрунзе, 1965.

14. Общие принципы построения емкостных самокомпенсированных уровнемеров (в соавторстве с Ф.Б.Гриневичем). Там же.

15. О некоторых видах погрешностей емкостных уровнемеров. Там же.