

6
А-24
СОВЕТ АЗЕРБАЙДЖАНСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТА НЕФТИ И ХИМИИ ИМ. М. АЗИЗБЕКОВА ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПО ЭНЕРГЕТИКЕ И АВТОМАТИЗАЦИИ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

НА ПРАВАХ РУКОПИСИ

Ш. М. ШАХМАРДАНОВ

ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ, ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ
ЭЛЕКТРОННЫХ АВТОКОМПЕНСАЦИОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ
УСТРОЙСТВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА СТАТИЧЕСКОГО ТИПА

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации, представленной на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель —
доктор технических наук, профессор
А. М. МЕЛИК-ШАХНАЗАРОВ

Уважаемый тов. _____

Совет Азербайджанского Ордена Трудового Красного Знамени института нефти и химии им. М. Азизбекова по присуждению ученых степеней по энергетике и автоматизации производственных процессов направляет Вам автореферат диссертационной работы **Ш. М. ШАХМАР-ДАНОВА**, на тему: «Вопросы разработки, исследования и применения электронных автокомпенсационных измерительных устройств переменного тока статического типа», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, и просит сообщить Ваши замечания по данной работе Ученому секретарю АЗИНЕФТЕХИМ им. М. Азизбекова (гор. Баку, проспект Ленина, 20).

Защита состоится _____ 1965 года.

Ученый секретарь Совета,
доктор технических наук, профессор

КУЛИЗАДЕ К. Н.

СОВЕТ АЗЕРБАЙДЖАНСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТА НЕФТИ И ХИМИИ ИМ. М. АЗИЗБЕКОВА ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПО ЭНЕРГЕТИКЕ И АВТОМАТИЗАЦИИ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

НА ПРАВАХ РУКОПИСИ

Ш. М. ШАХМАРДАНОВ

ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ, ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ
ЭЛЕКТРОННЫХ АВТОКОМПЕНСАЦИОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ
УСТРОЙСТВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА СТАТИЧЕСКОГО ТИПА

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации, представленной на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель —
доктор технических наук, профессор
А. М. МЕЛИК-ШАХНАЗАРОВ

Диссертация посвящена исследованию электронных статических автокомпенсаторов переменного тока, анализу вопросов их разработки и применения в различных измерительных системах специального и общего назначения.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения.

Первая глава работы посвящена исследованию структурных схем ФАК—ДМ. Исследуется влияние на погрешность автокомпенсатора изменения модулей коэффициентов передачи звеньев, изменения их фазовых характеристик, выбора места и способа включения измерителя. В этой же главе кратко рассмотрены основные положения теории автокомпенсаторов переменного тока прямого усиления.

Исследуемые автокомпенсаторы типа ФАК-ДМ представлены в виде трех основных структурных схем:

1. Схема электронного автокомпенсатора с измерителем постоянного тока, включенным до модулятора.

Основными элементами автокомпенсатора являются: входной измерительный контур, предварительный усилитель, фазочувствительный демодулятор с измерителем и модулятор. В измерительном контуре автокомпенсатора действует разность измеряемого и компенсирующего напряжений. Напряжение небаланса после усиления преобразуется каналом демодулятор—модулятор в компенсирующее напряжение. Показания измерителя автокомпенсатора определяются из выражения:

$$x = U_n \frac{\gamma k_1 k_2 \cos(\psi + \varphi + \varphi_1)}{1 + \gamma k_1 k_2 k_3 \cos(\psi + \varphi_1 + \varphi_2)} \cdot C \quad (1)$$

где: U_n — измеряемое напряжение;

γ — коэффициент деления напряжения в измерительном контуре автокомпенсатора;

ψ — фазовый сдвиг напряжения в измерительном контуре;

k_1, φ_1 — коэффициент усиления и фазовый сдвиг в предварительном усилителе;

k_2 — коэффициент передачи демодулятора;

k_3, φ_2 — коэффициент передачи и фазовый сдвиг модулятора;

φ — фазовый угол сдвига измеряемого напряжения относительно опорного;

C — постоянная измерителя.

Для оценки влияния параметров схемы автокомпенсатора на возможную предельную погрешность в работе выводится зависимость, связывающая предельную погрешность с величинами относительного изменения параметров:

$$\delta_{\text{пред}} = \left\{ \frac{\frac{\Delta\gamma}{\gamma} + \frac{\Delta k_1}{k_1} + \frac{\Delta k_2}{k_2}}{1 + \gamma k_1 k_2 k_3 \cos(\psi + \varphi_1 + \varphi_2)} + \frac{\gamma k_1 k_2 \cos(\psi + \varphi_1 + \varphi_2)}{1 + \gamma k_1 k_2 \cos(\psi + \varphi_1 + \varphi_2)} \frac{\Delta k_3}{k_3} + \right.$$

$$\left. + (\Delta\psi + \Delta\varphi_1) \left[\frac{1}{\text{ctg}(\psi + \varphi + \varphi_1)} + \frac{\frac{\sin(\varphi - \varphi_2)}{\cos(\psi + \varphi + \varphi_1)}}{\frac{1}{\gamma k_1 k_2 k_3} + \cos(\psi + \varphi_1 + \varphi_2)} \right] + \frac{\Delta\varphi}{\text{ctg}(\psi + \varphi_1 + \varphi_2)} + \frac{\Delta\varphi_2}{\text{ctg}(\psi + \varphi_1 + \varphi_2)} + \frac{\Delta C}{C} \right\} 100\% \quad (2)$$

Анализ этого выражения показывает, что влияние таких параметров, как γ, k_1, k_2 ослабляется действием обратной связи; изменения k_3 и C входят в общую погрешность без ослабления. Влияние фазовых углов также различно: при $\varphi = \varphi_2$ второй член коэффициента при $(\Delta\psi + \Delta\varphi_1)$ обращается в нуль, а первый уменьшается действием обратной связи. Если $\varphi \neq \varphi_2$, то второй член этого коэффициента уже не равен нулю и вносится дополнительная погрешность; следует также учитывать, что изменения φ и φ_2 непосредственно входят в погрешность. Таким образом, следует подчеркнуть важность равенства $\varphi \approx \varphi_2 \approx 0$. Оценивая в общем рассматриваемый компенсатор, следует отметить весьма жесткие требования, предъявляемые к модулятору, т. к. изменения его комплексного коэффициента передачи сильно влияют на погрешность.

2. Схема автокомпенсатора с измерителем постоянного тока, включенным после модулятора. Автокомпенсатор отличается от рассмотренного наличием второго модулятора с измерителем, включенным после модулятора. В схему второго демодулятора включено сопротивление R_k (на котором выделяется напряжение U_k) таким образом, что элементы схемы демодулятора охватываются обратной связью. Зависимость показаний измерителя от измеряемого напряжения в данном случае имеет вид:

$$x = U_n \frac{\gamma k_1 k_2 k_3 \cos(\psi + \varphi + \varphi_1)}{R_k + r_d + r_p + r_v + \gamma k_1 k_2 k_3 R_k \cos(\psi + \varphi_1 + \varphi_2)} \cdot C \quad (3)$$

где: r_d — сопротивление диода демодулятора;

r_p — сопротивление измерителя;

r_v — выходное сопротивление демодулятора.

Выражение для предельной относительной погрешности, полученное на основании (3), отличается от (2) тем, что резко уменьшается влияние на погрешность коэффициента k_3 . Влияние же сопротивления R_k незначительно, поскольку оно может быть выполнено достаточно стабильным. Однако влияние фазовых погрешностей модулятора одинаково для обеих схем. Таким образом, данная схема автокомпенсатора не предъявляет жестких требований к стабильности модуля коэффициента передачи модулятора, однако, требования к его фазовой характеристике остаются прежними.

Последующий анализ показал, что для уменьшения погрешности, вносимой φ_2 , необходимо применение фазочувствительного измерителя, управляемого общим опорным напряжением. Для этого случая выражение предельной относительной погрешности принимает вид:

$$\delta_{\text{пред}} = \left\{ \frac{\frac{\Delta\gamma}{\gamma} + \frac{\Delta\kappa_1}{\kappa_1} + \frac{\Delta\kappa_2}{\kappa_2} + \frac{\Delta\kappa_3}{\kappa_3}}{1 + \gamma\kappa_1\kappa_2\kappa_3\beta\cos(\psi + \varphi_1 + \varphi_2)} + \frac{\frac{\Delta r_d + \Delta r_p + \Delta r_b}{R_k + r_d + r_p + r_b}}{1 + \gamma\kappa_1\kappa_2\kappa_3\beta\cos(\psi + \varphi_1 + \varphi_2)} + \frac{1 + \gamma\kappa_1\kappa_2\kappa_3\cos(\psi + \varphi_1 + \varphi_2)}{R_k + r_d + r_p + r_b} \frac{\Delta R_k}{R_k} + \frac{\Delta C}{C} + (\Delta\psi + \Delta\varphi_1) \left[\frac{1}{\text{ctg}(\psi + \varphi + \varphi_1)} + \frac{\frac{\sin(\varphi - \varphi_2)}{\cos(\psi + \varphi + \varphi_1)}}{1 + \gamma\kappa_1\kappa_2\kappa_3\beta\cos(\psi + \varphi_1 + \varphi_2)} + \frac{1}{\gamma\kappa_1\kappa_2\kappa_3\beta + \cos(\psi + \varphi_1 + \varphi_2)} \right] + \Delta\varphi_2 \left[\frac{1}{\text{ctg}\varphi_2} + \frac{\frac{\sin(\psi + \varphi_1)}{\cos\varphi_2}}{1 + \gamma\kappa_1\kappa_2\kappa_3\beta\cos(\psi + \varphi_1 + \varphi_2)} + \frac{1}{\gamma\kappa_1\kappa_2\kappa_3\beta + \cos(\psi + \varphi_1 + \varphi_2)} \right] + \frac{\Delta\varphi}{\text{ctg}(\varphi + \varphi + \varphi_1)} \right\} 100\% \quad (4)$$

где: β — коэффициент обратной связи.

Расчеты по этой формуле показывают, что, например, для значений $\varphi_2 = 5^\circ$ и $\Delta\varphi_2 = 2,5^\circ$, при прочих равных условиях, $\delta\varphi_2 = 0,5\%$ для автокомпенсатора с нефазочувствительным вторым демодулятором и $\delta\varphi_2 = 0,15\%$ для рассматриваемого автокомпенсатора. Таким образом, схема автокомпенсатора с фазочувствительным измерителем, включенным после модулятора, позволяет существенно уменьшить погрешность от изменения фазы напряжения U_k .

Схема автокомпенсатора может быть рекомендована, в частности, для контроля процессов, связанных с поляризацией электродов, когда из-за влияния их емкости может измениться фаза напряжения U_k .

3. Схема автокомпенсатора с измерителем переменного тока, включенным после модулятора (измеритель компенсирующего напряжения U_k). Измерение напряжения U_k необходимо в некоторых специальных измерительных системах, предназначенных для контроля и измерения процессов с резко изменяющимися параметрами в цепи обратной связи. Зависимость компенсирующего напряжения от измеряемого для рассматриваемого автокомпенсатора имеет вид:

$$U_k = U_{\text{и}} \frac{\gamma\kappa_1\kappa_2\kappa_3\beta\cos(\psi + \varphi + \varphi_1)}{1 + \gamma\kappa_1\kappa_2\kappa_3\beta\cos(\psi + \varphi_1 + \varphi_2)} \cdot C. \quad (5)$$

Анализ предельной относительной погрешности автокомпенсатора, показывает, что погрешность от изменения модулей коэффициентов передачи звеньев автокомпенсатора, включая и звено обратной связи (что весьма существенно), ослабляется действием отрицательной обратной связи. Фазовые погрешности, возникающие в канале автокомпенсатора, входят в общую погрешность аналогично рассмотренным в I варианте схемы автокомпенсатора.

На основе изложенных в главе исследований проведен сравнительный анализ схем автокомпенсаторов и определены рациональные области их применения.

Электронные статические автокомпенсаторы прямого усиления. Эти автокомпенсаторы подразделены на автокомпенсаторы с измерением модуля выходного тока и автокомпенсаторы с измерением составляющих выходного тока. Следует отметить, что во всех случаях компенсация производится по модулю измеряемого напряжения. В работе приведены основные соотношения характеризующие работу ЭСАК прямого усиления. Электронные автокомпенсаторы прямого усиления (разработанные с участием автора) применены в системах автоконтроля. Получены высокие метрологические качества указанных систем (гл. IV).

Вторая глава работы посвящена разработке и исследованию элементов ЭСАК. Основные из них: предварительный усилитель, фазочувствительный демодулятор, модулятор и выходные измерительные схемы (второй демодулятор).

Предварительный усилитель. Характерным условием работы предварительного усилителя является наличие квадратурного сигнала на его входе с амплитудой, достигающей в некоторых случаях уровня полезного сигнала. Это обстоятельство является весьма важным фактором, определяющим коэффициент усиления и диапазон линейности усилителя. Диапазон линейности должен несколько превышать максимально возможную амплитуду квадратурного сигнала.

В зависимости от уровня и характера помехи в измеряемом напряжении выбирается степень избирательности усилителя с использованием RC или LC фильтров. При этом необходимо учитывать влияние нестабильности элементов фильтра на амплитудно-частотные (АЧХ) и фазочастотные характеристики (ФЧХ) усилителя. Для предварительных усилителей автокомпенсаторов, работающих в основном на фиксированных частотах, важнейшим фактором является стабильность ФЧХ в районе несущей частоты. С этой точки зрения неблагоприятны двойные Т-образные фильтры, фазовая характеристика которых претерпевает резкие изменения при незначительных расстройках. Учитывая эти соображения, в работе рекомендуется максимально использовать возможность применения ненастроенных усилителей.

В этом отношении весьма перспективны усилители с охватом отрицательной обратной связью всего тракта усиления, включая и демодулятор.

Демодулятор представляет собой схему фазочувствительного выпрямителя (ФЧВ), определяющего фазовую избирательность и точность автокомпенсатора. Требования к ФЧВ в схемах ЭСАК в основном аналогичны общеизвестным требованиям к ФЧВ в следящих системах. Из ряда этих требований следует особо выделить необходимость высокой избирательности по фазе к напряжению квадратурного сигнала, поскольку условия работы ФЧВ в ЭСАК в большинстве своем также характеризуются наличием квадратурного сигнала, превышающего по амплитуде измеряемое напряжение. Фазовая избирательность ФЧВ при больших сигналах на входе во многом определяется принципом построения его схемы. С этой точки зрения ключевые ФЧВ предпочтительнее перед суммо-разностными, т. к. за счет разделения цепей опорного и измеряемого сигналов они обладают лучшей фазовой избирательностью.

В работе намечены области применения, как ключевых, так и суммо-разностных ФЧВ, определяемые условиями эксплуатации автокомпенсатора.

Модулятор в тракте автокомпенсатора включается после ФЧВ, преобразуя его напряжение в напряжение U_k . Основным требованием, предъявляемым к модуляторам, применяемым в автокомпенсаторах, является малый процент содержания гармоник в его выходном напряжении и стабильность фазы. Требования к стабильности коэффициента передачи и уровню остаточного напряжения определяются способом включения измерителя.

Существующие схемы модуляторов в основном обладают линейной характеристикой преобразования. При проектировании ЭСАК для специальной измерительной аппаратуры (напр. геофизической) возникает необходимость введения системы АРУ в тракт автокомпенсатора. Наиболее просто эта задача решается применением модулятора с нелинейной характеристикой преобразования. С этой целью разработана схема модулятора, использующая нелинейность сеточной характеристики пентода. Модулятор обладает прямой зависимостью выходного напряжения от управляющего. Характеристика преобразования для выбранного режима достаточно точно аппроксимируется следующим выражением:

$$U_{\text{в}} = a_0 U_{\text{упр}} + a_1 U_{\text{упр}}^2 + a_2 U_{\text{упр}}^3 \quad (6)$$

где $a_0 = 0,02$; $a_1 = -0,183$; $a_2 = 0,83$.

Полученное выражение использовано для анализа динамики автокомпенсатора геофизической аппаратуры бокового каротажа.

Выходные измерительные схемы (ВИС) в тракте автокомпенсатора следуют после модулятора и предназначены для подключения измерителя. В основе ВИС лежат однополупериодные и двухполупериодные схемы нефазочувствительных и фазочувствительных демодуляторов. Для них характерно наличие в общей токовой цепи сопротивления, на котором выделяется компенсирующее напряжение U_k . Т. о., все элементы ВИС охватываются действием обратной связи.

В результате исследования нефазочувствительных ВИС в работе показано, что на их погрешность при малых напряжениях оказывает большое влияние обратное сопротивление диодов, которое при напряжениях в несколько десятков милливольт становится соизмеримо с прямым сопротивлением диодов. Однако при напряжениях, превышающих 200 мВ, влиянием обратного сопротивления можно пренебречь. С этой точки зрения наиболее благоприятны диоды типа Д-223, Д-225 и ламповые диоды. Перспективно также применение полупроводниковых триодов в инверсном включении. Базовая цепь триодов в этом случае питается частью напряжения сигнала. При этом удастся получить надежное выпрямление, начиная с напряжений порядка нескольких десятков милливольт.

Разработаны фазочувствительные ВИС на основе ключевых ФЧВ с остаточным напряжением не более 500 мкВ.

Общим для всех рассмотренных ВИС является искажение формы компенсирующего напряжения U_k из-за отсечки напряжения, присутствующей диодам, и за счет запаздывания срабатывания ключей. Анализ спектра напряжения U_k позволил найти пути уменьшения влияния гармоник на точность и устойчивость работы ЭСАК.

Третья глава работы посвящена вопросам применения автокомпенсаторов с преобразованием напряжения (типа ФАК-ДМ). В главе рассматриваются вопросы применения ФАК-ДМ в специальных измерительных системах, предназначенных для геофизических исследований скважин (по методу бокового каротажа); излагаются рекомендации по применению автокомпенсаторов в системах централизованного контроля и в счетно-решающих устройствах.

При исследовании скважин по методу бокового электрического каротажа требуется сфокусировать ток центрального электрода зонда при помощи токов экранных электродов и направить его в исследуемые породы. В частности, при каротаже с семиэлектродным зондом в качестве фокусирующего устройства применяется ЭСАК. Электроды семиэлектродного зонда располагаются на отрезке кабеля симметрично относительно центрального электрода в следующем порядке: $A_3, N, M, A_0, M', N', A_3$. В стандартной схеме зонда одноименные измерительные электроды M, M', N, N' , соединены между собой так же, как и экранные электроды A_3, A_3 . Через экранные электроды пропускается ток того же направления, что и через электрод A_0 . В процессе каротажа ток экранных электродов при помощи ЭСАК регулируется

так, чтобы разность потенциалов между измерительными электродами не превышала напряжение небаланса, определяемое статизмом автокомпенсатора. Таким образом, ток центрального электрода оказывается сфокусированным в направлении перпендикулярном к скважине. При этом регистрируется потенциал одного из измерительных электродов.

Условия работы ЭСАК в аппаратуре бокового каротажа характеризуется пространственным растеканием токов в породе, чередованием пород с резко различными сопротивлениями, явлением поляризации электродов. В результате поляризации сопротивление электрода становится комплексным и носит емкостный характер.

Указанные особенности накладывают жесткие ограничения на выбор структурной схемы ЭСАК для аппаратуры бокового каротажа. В результате исследований, проведенных (с участием автора) на кафедре электронизмерений и вычислительной техники Азербайджанского института нефти и химии им. М. Азизбекова, для аппаратуры бокового каротажа с семиэлектродным зондом (БК-7) была принята структурная схема ЭСАК типа ФАК-ЦМ.

Наличие канала постоянного тока в автокомпенсаторе позволило просто осуществить АРУ путем применения модулятора с нелинейной характеристикой преобразования. Теоретические исследования автокомпенсатора, как нелинейной САУ с привлечением частотных методов показали, что благодаря действию АРУ, резко расширяется область устойчивости. Экспериментальные исследования подтвердили устойчивую работу автокомпенсатора при 100 % обратной связи. Таким образом, обеспечивается устойчивость автокомпенсатора в скважинных условиях.

Для изучения влияния фазовых характеристик электродов зонда на точность работы автокомпенсатора в работе проанализированы эквивалентные схемы пространственной компенсации при боковом семиэлектродном каротаже.

Установлено, что автокомпенсатор работает на принципе компенсации напряжения. Последнее обстоятельство позволило путем преобразования эквивалентной схемы электрических цепей зонда в эквивалентную схему компенсации напряжений исследовать влияние фазовых сдвигов на электродах зонда на точность работы автокомпенсатора.

В результате этих исследований установлено, что основное влияние на погрешность автокомпенсатора оказывает фазовый сдвиг напряжения на экранированных электродах зонда. Фазовый сдвиг напряжения в этом случае в основном определяется фазовой характеристикой выходного каскада автокомпенсатора (фазовый сдвиг, вносимый самими электродами, может быть устранен применением малополяризующихся электродов из железа).

Фазовый сдвиг выходного каскада автокомпенсатора существенно зависит от величины сопротивления нагрузки (сопротивление заземления экранного электрода R_3). Например, при изменениях R_3 от 1 до 100 Ом фаза выходного напряжения автокомпенсатора изменяется на величину $\Delta\varphi_2 = 30^\circ$. Исследования этого вопроса показали, что, применяя фазовую коррекцию в выходном каскаде, удается уменьшить величину $\Delta\varphi_2$ до $\pm 3,5^\circ$. При этом дополнительная погрешность не превышает $\pm 1,5\%$ (основная погрешность 10 %).

Дальнейшее уменьшение этой погрешности до величины $\pm 0,5\%$ может быть достигнуто применением регистрации составляющей потенциала, совпадающей по фазе с опорным напряжением (напряжение глубинного генератора). В блок-схеме такой аппаратуры предусматривается применение усилителя потенциала с фазочувствительным каналом.

Основываясь на эквивалентной схеме компенсации, в работе проведено исследование влияния потенциалов верхней M' , N' и нижней M , N пар измерительных электродов зонда на качество записи диаграмм, когда зонд находится на границе пластов с резко различными удельными сопротивлениями. Эти исследования показали, что за счет различных потенциалов указанных электродов по проводам, соединяющим одноименные электроды M , M' и N , N' , протекают уравнительные токи, которые из-за разницы в сопротивлениях этих проводов и переходных сопротивлений электродов создают дополнительное напряжение на входе автокомпенсатора. Расчеты показывают, что величина этого напряжения может значительно превысить порог чувствительности автокомпенсатора и т. о. нарушить режим компенсации последнего.

Нарушение режима компенсации может также произойти из-за явления экранирования тока экранного электрода, явно выраженное при больших отношениях сопротивлений смежных пород (колонна-порода, каверна-порода). При этом часть тока экранного электрода отсасывается пластом с малым удельным сопротивлением. Указанные явления (подтверждены экспериментально снятыми фазовыми диаграммами на скважине) явились причиной искажения диаграмм на участках скважины с большим отношением сопротивлений смежных пород (> 20).

Для устранения нарушения режима компенсации за счет явления перетекания токов в работе рекомендуется разделение цепей измерительных электродов зонда при помощи трансформатора с двумя первичными обмотками.

Для уменьшения влияния эффекта экранирования токов экранных электродов зонда на режим компенсации необходимо применять раздельное регулирование токов экранных электродов в зависимости от амплитуды напряжения на соответствующих парах измерительных электродов зонда.

В соответствии с проведенными исследованиями и накопленным опытом разработки и испытаний аппаратуры бокового каротажа разработана новая аппаратура БК-7 с разделением электрических цепей измерительных электродов зонда при помощи специального трансформатора.

В результате скважинных испытаний этой аппаратуры получены диаграммы бокового каротажа, повторяющиеся как по конфигурации, так и по амплитудам, а также удовлетворительно сопоставляющиеся с диаграммами, зарегистрированными стандартной аппаратурой АБК-3. Искажения диаграмм вследствие нарушения режима компенсации не отмечались. На основе схемы и конструкции аппаратуры БК-7 разработана аппаратура для бокового микрокаротажа скважин, предназначенная для исследования части пласта, прилегающего непосредственно к скважине.

В процессе скважинных испытаний этой аппаратуры получены диаграммы, хорошо сопоставляющиеся с кривыми стандартного микрокаротажа в низкоомной части и с кривыми бокового каротажа в высокоомной. Проведенные испытания аппаратуры подтвердили основные положения и результаты изложенных исследований.

Далее в главе рассматриваются вопросы применения автокомпенсатора типа ФАК-ДМ в системах централизованного контроля параметров технологического процесса, где компенсатор осуществляет точное преобразование переменного напряжения датчиков в постоянное. Проведенные в этом направлении исследования показали, что для этих целей наиболее перспективна схема автокомпенсатора с измерителем постоянного тока, включенным до модулятора. Высокая точность преобразования может быть обеспечена применением термостабилизированного модулятора Холла. Исследования динамики автокомпенсатора на электронной модели позволили найти оптимальные значения комплексных коэффициентов передачи звеньев, при которых время переходного процесса не превышает 0,012 сек.

Автокомпенсатор типа ФАК-ДМ может быть также применен и в счетно-решающих устройствах, например, для осуществления деления двух напряжений. Как следует из (1), при $\gamma k_1 k_2 k_3 \cos(\psi + \varphi_1 + \varphi_2) \gg 1$ и $\psi + \varphi_1 + \varphi_2 \approx 0$, показания измерителя определяются следующим образом:

$$\alpha = \frac{U_{II}}{K_3} \quad (7)$$

где K_3 коэффициент передачи модулятора. Если $K_3 = f(U)$, то $\alpha = \frac{U_{II}}{U}$. Таким образом, показания измерителя пропорциональны част-

ному от деления двух напряжений. В практической схеме автокомпенсатора должен быть применен модулятор с линейной зависимостью коэффициента передачи от опорного напряжения (магнитный модулятор и др.).

Четвертая глава работы посвящена исследованию вопросов применения ЭСАК прямого усиления в системах автоконтроля и измерения. В этой главе в основном рассмотрены особенности разработки и применения ЭСАК в промышленных системах автоконтроля, характеризующихся наличием квадратурного сигнала в выходном напряжении датчика.

Одним из возможных решений, позволяющих получить высокую точность автоконтроля, является применение в качестве приемного устройства автокомпенсатора с астатической компенсацией полезного сигнала датчика (при помощи калиброванного реохорда) и статической компенсацией квадратурного сигнала при помощи ЭСАК-прямого усиления.

В результате проведенного анализа выявлены требования к схеме ЭСАК. Показано, что для достижения требуемой точности (0,1–0,3%) ЭСАК должен обладать весьма малым фазовым углом (2'–4').

В соответствии с этим разработаны схемы ЭСАК фазочувствительного и ЭСАК-формирователя опорных напряжений. ЭСАК-фазочувствительный орган выполнен в виде электронного усилителя переменного тока с ключевой фазочувствительной ВИС, охваченных отрицательной обратной связью. Полупроводниковые ключи ВИС коммутируются напряжениями, формируемыми в блоке опорного напряжения. Автокомпенсатор характеризуется следующими параметрами: усиление по цепи обратной связи $K\beta = 50$; фазовый угол — не превышает нескольких минут, линейность амплитудной характеристики не нарушается при совместном воздействии полезного сигнала, равного 50 мВ и квадратурного сигнала, равного 25 мВ. В блоке опорных напряжений применена схема ЭСАК-формирователя прямоугольной формы напряжений. Схема построена таким образом, что ключи формирователя схватываются обратной связью. Автокомпенсатор характеризуется малым фазовым углом (несколько минут). Оба ЭСАК применены в схеме одноканального автокомпенсационного измерителя с астатическо-статическим уравниванием напряжения датчика электромагнитного расходомера. При параметрах датчика $U_{II\max} = 50$ мВ, $U_{кв\max} = 25$ мВ получены следующие результаты: величина погрешности от наличия квадратурного сигнала не превышает 0,03%; общая погрешность автокомпенсационного измерителя не превышает 0,3% при пороге чувствительности 15 мкВ.

На основе одноканального автокомпенсатора с астатическо-статическим уравниванием разработан прямоугольно-координатный автокомпенсатор с поочередным измерением составляющих напряжения сигнала. Автокомпенсатор выгодно отличается от существующих

7. В результате проведенных исследований: разработана, изготовлена и испытана в скважинных условиях аппаратура бокового каротажа на одножильном кабеле с семиэлектродным зондом, позволяющая получить устойчивую запись диаграмм КС при больших отношениях удельных сопротивлений смежных пород;

разработана, изготовлена и испытана в скважинных условиях аппаратура бокового микрокаротажа, которая в настоящее время подготавливается к серийному выпуску;

разработан и изготовлен одноканальный автокомпенсатор с астатического-статическим уравниванием измеряемого сигнала с порогом чувствительности 15 мкв и приведенной погрешностью 0,3%;

разработана схема прямоугольно-координатного автокомпенсатора статического типа прямого усиления;

разработана и изготовлена токовая балансная система телеизмерения с электронным автокомпенсатором с погрешностью телеизмерения 1%.

Основные положения работы были доложены на конференциях профессорско-преподавательского состава Азербайджанского института нефти и химии им. М. Азизбекова в 1963—1964 гг.; на II межвузовской конференции по автоматизации и механизации технологических процессов в нефтяной промышленности, проведенной в 1960 г. Азербайджанским институтом нефти и химии им. М. Азизбекова в г. Баку; на III всесоюзной конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений, проведенной Институтом автоматики и электрометрии СО АН СССР в 1961 г. в г. Новосибирске.

По материалам диссертации опубликованы следующие работы:

1. Ш. М. Шахмарданов. К вопросу об устойчивости электронных регуляторов тока для геофизической аппаратуры. Ученые записки IX серия, № 1, АЗИНЕФТЕХИМ, Баку, 1964 г.

2. Ш. М. Шахмарданов. Электронный прямоугольно-координатный автокомпенсатор, авторское свидетельство № 151721, класс G 01 г; 21 e, 32 от 22. II. 62 г.

3. Ш. М. Шахмарданов. Телеизмерительная система с электронным автокомпенсатором. ПНТПО, системы телемеханизации, автоматического управления и регулирования. Выпуск II, тема 29 № А-62-23-11, ГОСИТИ, Москва, 1962 г.

4. А. М. Мелик-Шахназаров, А. Г. Мельников, Ш. М. Шахмарданов. Электронные автокомпенсаторы и авторегуляторы переменного тока для геофизических устройств. Труды III конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений. СО АН СССР, том I, г. Новосибирск, 1964 г.

5. А. М. Мелик-Шахназаров, И. Л. Шайн и Ш. М. Шахмарданов. Автоматический компенсатор переменного тока с астатическо-статическим уравниванием. Измерительная техника, № 8, 1964.

6. А. Г. Мельников, Ш. М. Шахмарданов. Электронные модуляторы с нелинейной характеристикой преобразования для геофизических измерительных устройств. АЗИНТИ, л. т. н. № 3, Баку, 1963 г.

7. А. Г. Мельников, Ш. М. Шахмарданов, В. Т. Чукин. К вопросу исследования аппаратуры бокового каротажа с семиэлектродным зондом. Нефть и газ, № 4, Баку, 1964 г.

8. Ш. М. Шахмарданов, А. М. Мелик-Шахназаров, А. Г. Мельников, В. И. Нефтяков, В. Г. Чукин. Устройство для бокового каротажа с семиэлектродным зондом, авторское свидетельство № 155575, класс НО5d; 21g; 30₀₁ от 29. V. 62 г.

9. И. Л. Шайн, Ш. М. Шахмарданов. Однореохордный компенсатор переменного тока, авторское свидетельство, № 160759, класс 21e, 32 МПКГО1 г УДк, заявлено 07. II. 1963.

10. Ш. М. Шахмарданов. Балансная система телеизмерения давления на полупроводниковых элементах для нефтяных и газовых промыслов, Нефть и газ», № 5, Баку, 1961 г.

