

6
A-25
"Для служебного пользования"

экз. №

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР
Новосибирский электротехнический институт

Ю.Ф. Чусовков

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВ ФОРМИРОВАНИЯ
ОПОРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ
ЦИФРОВЫХ ВОЛЬТМЕТРОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук
старший научный сотрудник
И.Ф. Клисторин

Новосибирск
1967 г.

"Для служебного пользования"

экз. №

14

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР
Новосибирский электротехнический институт

Ю.Ф. Чусовков

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВ ФОРМИРОВАНИЯ
ОПОРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ
ЦИФРОВЫХ ВОЛЬТМЕТРОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

О т л о ж е н и е

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук
старший научный сотрудник
И.Ф. Клысторан

Новосибирск

1967 г.

Автоматические цифровые измерительные приборы (АЦИП) являются одним из наиболее перспективных средств получения количественной информации как для ввода данных в устройства обработки и управления, так и для использования человеком-оператором при контроле производственных процессов и проведении научных исследований.

В последнее десятилетие достигнуты значительные успехи в разработке АЦИП, предназначенных для измерения ряда электрических и неэлектрических величин. В первую очередь это касается приборов для измерения мгновенных и средних значений напряжений, а также параметров цепей на постоянном и переменном токе синусоидальной формы.

В то же время в практике измерительного эксперимента все чаще приходится иметь дело с существенно несинусоидальными токами и напряжениями, причем, как правило, требуется знание их действующих значений. В связи с этим назрела необходимость разработки принципов создания новых приборов, позволяющих с высокой точностью измерять действующее значение периодических напряжений произвольной формы в достаточно широком диапазоне частот. Наиболее полно решению этой задачи отвечает известный в измерительной технике метод компарирования, который однако до недавнего времени практически не находил применения при построении автоматических цифровых вольтметров переменного тока (АЦВ). Причиной этому явились сложность автоматизации, необходимость длительного уравнивания схем, малая перегрузочная способность и узкий динамический диапазон компараторов, построенных по известным принципам.

В Институте автоматики и электрометрии СО АН СССР предложены несколько способов построения АЦВ компараторного типа, обеспечивающих высокую точность и быстродействие приборов и удовлетворяющих основным требованиям ит. серийного производства. Среди них имеется весьма перспективный для промышленного освоения новый способ измерения периодических напряжений произвольной формы в непрерывном широком диапазоне частот, основанный

на использовании так называемого "принципа формирования опорного напряжения". Этот принцип, предложенный в 1960 г. И.Ф. Клицторным, положил начало исследованиям по созданию первых отечественных АЦВ переменного тока, которые патентуются за рубежом.

Сущность его заключается в сравнении измеряемого напряжения с некоторым опорным, которое формируется из измеряемого в самом приборе так, что величина опорного напряжения поддерживается неизменной независимо от уровня входного напряжения, а форма — повторяет форму измеряемого. Показания прибора пропорциональны одному из трех значений напряжения (действующему, среднему или амплитудному) переменного тока в зависимости от того, по какому из них производится формирование опорного напряжения.

Исследование АЦВ этого принципа действия показало, что их метрологические и эксплуатационные характеристики (точность, частотный и динамический диапазон, быстродействие) определяются в первую очередь свойствами устройств формирования опорного напряжения (ФОН).

Поэтому первой задачей настоящей работы является изыскание путей расширения частотного и динамического диапазонов, повышения точности, быстродействия и упрощения схемы устройств ФОН, отвечающих требованиям серийного производства АЦВ.

Дальнейшее исследование принципа позволило предложить более совершенную структурную схему АЦВ, основанную на измерении переменного параметра устройства ФОН, в частности, его коэффициента передачи, с помощью источника вспомогательного напряжения. В связи с этим возникла вторая задача реферируемой работы — создание новых устройств ФОН, коэффициент передачи которых может запоминаться, а затем измеряться за сравнительно короткий промежуток времени.

Диссертационная работа содержит четыре главы, заключение, библиографию и приложение.

I

В первой главе дан краткий анализ принципов построения устройств ФОН и проведена сравнительная оценка существующих многочисленных вариантов их схем и элементов, разработанных в основном в ИАЭ СО АН СССР С.Т. Васильевым.

Устройство формирования опорного напряжения может быть пред-

ставлено в общем виде четырехполюсником с переменным коэффициентом передачи, выполненным на основе широкополосного усилителя с задержанной автоматической регулировкой усиления (АРУ), и отнесено к классу прецизионных стабилизаторов напряжения переменного тока компенсационного типа. Измерительным элементом устройств ФОН является компарирующий преобразователь, обеспечивающий в заданной точке высокую точность сравнения формируемого напряжения с образцовым напряжением постоянного или переменного тока. Ранее проведенные исследования показали, что условию компарирования напряжений по действующему значению в широком диапазоне частот в наибольшей степени отвечают электро-тепловые компарирующие преобразователи: термопреобразователи, термисторы, вакуумные диоды с вольфрамовым катодом в режиме насыщения, лампы накаливания совместно с фоторезисторами. Из них самыми совершенными при использовании в устройствах ФОН оказываются фотоэлектрические преобразователи, так как они обладают наибольшими коэффициентом преобразования (чувствительностью) и быстродействием.

Коэффициент усиления широкополосного усилителя можно представить следующим выражением:

$$K_v = f(S, R_n, \beta_{c.c.}, K_2) \quad (I)$$

где S — условное обозначение любого из параметров усилительного элемента (лампы, транзистора и т.п.), от которого зависит усиление каскада;

R_n — сопротивление нагрузки;

$\beta_{c.c.}$ — коэффициент обратной связи;

K_2 — коэффициент деления делителя, включенного между каскадами усиления.

Из выражения (I) видно, что воздействовать на K_v можно, изменяя один из указанных параметров, определяющих четыре способа регулировки усиления.

В зависимости от типа регулирующего элемента, который характеризуется крутизной преобразования $S_p = \frac{dK_v}{dE_p}$ и передаточной функцией $K(p)$ для регулирующего напряжения E_p цепи АРУ, а также способа регулировки коэффициента усиления производится классификация и сравнительная оценка различных вариантов устройств формирования.

Основным достоинством первого и четвертого способов регу-
лировки является относительное постоянство основных характе-
ристик устройства ФОН (частотные и нелинейные искажения) во
всем динамическом диапазоне. Второй и третий способ отличаются
большой простотой осуществления регулировки, а третий, допол-
нительно — легкостью согласования параметров цепей тракта уси-
ления и АРУ. В зависимости от вида передаточной функции регу-
лирующие элементы при анализе схем устройств ФОН принято де-
лить на два основных типа:

- а) РЭ-I рода, у которых $K(p) \neq 0$;
- б) РЭ-II рода, имеющих $K(p) = 0$.

В диссертации предложены безинерционные регулирующие эле-
менты, не повышающие порядок дифференциального уравнения сис-
темы. К ним относятся комбинированный каскодный усилитель с
регулируемым параметром S и нелинейное управляемое сопро-
тивление делителя K_d на основе высокочастотного транзистора.
Последний по своим свойствам приближается к идеальным регуля-
торам II рода, наиболее полно отвечающим требованиям АРУ в ши-
рокополосных усилителях. Устройство ФОН признано целесообраз-
ным делать двухступенчатым, содержащим предварительную и око-
нечную ступени формирования.

По данным предварительного анализа сделан вывод о том, что
существующие варианты устройств ФОН еще не могут быть рекомен-
дованы для промышленного освоения вследствие большой сложности
схемы и недостаточно высоких технических характеристик и что
их следует рассматривать прежде всего как экспериментальное до-
казательство реализации нового принципа построения АЦВ. Далее
уточняется круг задач, подлежащих рассмотрению. Он сводится к
исследованию и разработке:

- а) более совершенных схем устройств ФОН, отвечающих требо-
ваниям серийного производства АЦВ;
- б) исследованию путей создания устройств ФОН с запоминани-
ем коэффициента передачи, потребовавшихся для реализации новых
структурных схем АЦВ с повышенными метрологическими характе-
ристиками.

II

Вторая глава диссертации посвящена вопросам повышения мет-
рологических и эксплуатационных характеристик предварительных

ступеней устройств ФОН: расширению их частотного и динамиче-
ского диапазонов, снижению погрешности предварительного форми-
рования опорного напряжения. Известный способ уменьшения ошиб-
ки системы АРУ и расширения ее динамического диапазона путем
увеличения числа последовательно соединенных ступеней формиро-
вания находится в противоречии с условием обеспечения малых
частотных и нелинейных искажений и приводит к значительному ус-
ложнению схемы.

Однако, имеется другая возможность существенного повышения
коэффициента стабилизации, от которого зависят погрешность и
динамический диапазон отдельной ступени, за счет введения в
цепь АРУ дополнительного контура положительной параметрической
обратной связи.

Проведен анализ такой ступени, на основании которого пред-
ложена схема, в которой благодаря специальной конструкции фо-
тоэлектрического преобразователя на одинаковых фоторезисторах
удается повысить коэффициент стабилизации, не увеличивая поряд-
ка дифференциального уравнения ступени и не снижая ее быстро-
действия и устойчивости. Поскольку в предварительных ступенях
может быть допущена значительная статическая ошибка формиро-
вания, в них с целью упрощения схемы функции измерительного и ре-
гулирующего элементов могут быть совмещены в одном фотоэлектри-
ческом преобразователе, а уровень формируемого напряжения за-
дан параметрически.

Для повышения линейности амплитудной и выравнивания частот-
ных характеристик ступени, выполненной на транзисторах, исполь-
зуются различного рода отрицательные обратные связи. Поэтому в
ней наиболее подходящим оказывается способ регулировки усиле-
ния за счет изменения коэффициента обратной связи β_{ac} . При
других способах регулировки наличие этих связей противоречит
принципу регулируемости коэффициента усиления K_v .

Найдено условие оптимального согласования сопротивления
фоторезистора, выполняющего функции инерционного регулятора II
рода в транзисторных схемах, для регулирования параметра цепи
связи β_{cc} усилительного каскада

$$R_{\phi}^c = R_{ex} \sqrt{1 + K_{v \max}}, \quad (2)$$

где R_{ex} — эквивалентное входное сопротивление каскада;

$K_{v \max}$ — максимальный коэффициент усиления этого каскада, т.е. его коэффициент усиления с разомкнутой цепью обратной связи. Важной особенностью предварительной ступени формирования является возможность исключения усилителя мощности из основного тракта прохождения формируемого сигнала и приемлемость условия $K_v \leq 1$, поэтому она может быть выполнена на пассивных элементах, обладающих высокой линейностью вольтамперных характеристик. Предложена схема, обеспечивающая динамический диапазон изменений входного напряжения более 100 в диапазоне частот 45 гц + 5 кгц. Расширение частотного диапазона в сторону верхних частот ограничивается шунтирующим действием паразитных емкостей на сопротивление фоторезисторов. Предварительная ступень на активных элементах (транзисторах) обеспечивает динамический диапазон 10 в полосе частот 45 гц + 100 кгц и выше. В ней частотный диапазон ограничен сверху усилительными свойствами транзисторов на высоких частотах.

Составлена система уравнений для статического режима ступени с трехконтурной обратной связью (две инерционные параметрические — положительная и отрицательная обратные связи и одна безинерционная с регулируемым коэффициентом β_{oc}).

$$U_{\text{вых}} = \frac{h_{212} R_H (R_\Phi + R'_1)}{h_{113} (R_\Phi + R'_1) (1 + h_{222} R_H) + h_{211} R'_1 R_H} U_{\text{вх}}, \quad (3)$$

$$U_{\text{н.н.}} = \frac{R'_2}{R'_2 + R_\Phi} K_M U_{\text{вых}}, \quad (4)$$

$$C_g R_\Phi = \frac{\alpha}{\sqrt{q} \sqrt{U_{\text{н.н.}}} - b}, \quad (5)$$

где h_{ij} — параметры транзистора в схеме с общим эмиттером, α, q и b — постоянные коэффициенты функций аппроксимации статических характеристик элементов фотоэлектрического преобразователя.

Из нее выведено линеаризованное уравнение в приближении для малых отклонений действующего значения входного напряжения от некоторого уровня $U_{\text{вх}}^0$.

$$\Delta U_{\text{вых}} = \frac{K_v^0}{1 + S_p \frac{M'}{1 - K_M U_{\text{вх}}^0 K_v^0 \frac{dK_v}{dU_{\text{н.н.}}}}} \Delta U_{\text{вх}}, \quad (6)$$

где K_M и K_v — коэффициент усиления усилителя мощности и коэффициент передачи делителя в цепи положительной обратной связи, вынесенных за пределы тракта прохождения формируемого сигнала;

M' — коэффициент, зависящий от положения рабочей точки на характеристике фотоэлектрического преобразователя ($M'=0, 1+0, 9$).

Знаменатель полученного выражения определяет коэффициент стабилизации предварительной ступени.

При условии

$$1 - K_M K_v^0 U_{\text{вх}}^0 \frac{dK_v}{dU_{\text{н.н.}}} < 0 \quad (7)$$

становится возможным перерегулирование, обусловленное действием положительной параметрической обратной связи, которое допустимо для повышения коэффициента стабилизации ступени. Однако при этом должно обеспечиваться условие

$$\left| \frac{S_p M'}{1 - K_M K_v^0 U_{\text{вх}}^0 \frac{dK_v}{dU_{\text{н.н.}}}} \right| > K_v^0 - 1. \quad (8)$$

Вследствие существенной нелинейности вольтамперных и регулировочных характеристик лампы накаливания, фоторезистора и регулируемого элемента соотношение глубин положительной и отрицательной обратной связи изменится в различных точках динамического диапазона. Ввиду невозможности точной компенсации по диапазону предложено получать и использовать немонотонную, S-образную амплитудную характеристику ступени, при которой средний коэффициент стабилизации в заданном динамическом диапазоне оказывается наибольшим. Рекомендован способ оптимального сопряжения S-образной с идеальной амплитудной характеристикой ступени по "трем точкам".

Динамика ступени как широкополосного усилителя с автоматической регулировкой усиления при действии одного контура отрицательной параметрической обратной связи характеризуется нелинейным дифференциальным уравнением с переменными коэффициентами, зависящими от вида функции $U_{\text{вх}}(t)$. Решить его в общем виде не удастся, однако рассматривая конкретные частные виды входных возмущений, можно решить такие важные задачи для проектирования и настройки устройств ФОН, как нахождение ошибки

системы и определения ее устойчивости при каждом данном значении входного напряжения. Наконец, можно найти реакцию цепи АРУ на скачок входного напряжения, т.е. определить наиболее важную характеристику переходных процессов.

Введение дополнительной цепи положительной обратной связи, которая является также параметрической, приводит к существенным качественным изменениям не только статических, но и динамических свойств ступени. Напряжение $U_{\delta_{ix}}(t)$, которое в данном случае является возмущением для контура дополнительной обратной связи, следует теперь считать переменным параметром, вследствие чего меняется вид уравнения, и к системе АРУ даже при линейной зависимости $K_v = f(Y_\varphi)$ неприменим принцип суперпозиции, на котором основаны методы анализа линейных систем. Однако нелинейность, обусловленная параметрическим характером дополнительной обратной связи устраняется, если рассмотреть частный случай, когда фоторезисторы положительной и отрицательной обратной связи взяты одинаковыми. В предложенной схеме они соединены последовательно друг с другом и освещаются одновременно одной и той же лампой накаливания с одинаковой интенсивностью, поэтому регулируемый усилитель и регулируемый делитель можно рассматривать как некоторый единый регулируемый объект с коэффициентом передачи

$$H_v(Y_\varphi) = K_v(Y_\varphi) \cdot K_d(Y_\varphi), \quad (9)$$

величина которого зависит от проводимости фоторезистора $Y_\varphi(t)$. Качественное отличие аппроксимирующей функции

$$H_v = G_{P,(k)} - G_{P,(k)} Y_\varphi \quad (10)$$

состоит в том, что коэффициент $G_{P,(k)}$ может принимать как отрицательные, так и положительные значения в зависимости от выбранного k -того участка регулировочной характеристики. Значение этих коэффициентов может быть определено из семейства регулировочных характеристик, приведенных в диссертации.

Дифференциальное уравнение решено с использованием преобразования Лапласа, в результате чего найдено время переходного процесса

$$t_{npk} = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{\sqrt{1 + \frac{\alpha^2}{\omega^2}}}{\delta_s U_{\delta_{ix}} \left[\frac{G_{P,(k)}}{G_{P,(k)} \frac{(G_{P,(k)} U_{\delta_{ix}} - U_0) K_\Sigma}{1 + U_{\delta_{ix}} G_{P,(k)} K_\Sigma} - 1} \right]} \quad (11)$$

при колебательном режиме и

$$t_{npa} = \frac{1}{\alpha - \beta} \ln \frac{\frac{\alpha + \beta}{2\beta}}{\delta_s U_{\delta_{ix}} \left[\frac{G_{P,(k)}}{G_{P,(k)} \frac{(G_{P,(k)} U_{\delta_{ix}} - U_0) K_\Sigma}{1 + U_{\delta_{ix}} G_{P,(k)} K_\Sigma} - 1} \right]} \quad (12)$$

при аperiodическом режиме, где

$$p_{1,2} = \alpha \pm \beta = -\frac{\tau_n + \tau_\varphi}{2\tau_n \tau_\varphi} \pm \frac{\sqrt{(\tau_n - \tau_\varphi)^2 - 4\tau_n \tau_\varphi K_\Sigma G_{P,(k)} U_{\delta_{ix}}}}{2\tau_n \tau_\varphi} \quad (13)$$

корни характеристического уравнения;

K_Σ - коэффициент усиления канала АРУ;

$\delta U_{\delta_{ix}}$ - динамическая погрешность формирования опорного напряжения на выходе предварительной ступени.

Условие устойчивости ступени с положительной обратной связью состоит в выполнении неравенства

$$K_\Sigma G_{P,(k)} U_{\delta_{ix}} > (-1) \quad (14)$$

В схему I ступени предложено ввести специальные регулировки, позволяющие изменять знак и модуль коэффициента $G_{P,(k)}$ и модуль $G_{P,(k)}$ так, чтобы обеспечить необходимое сопряжение S - образной амплитудной характеристики ступени с ее идеальной характеристикой.

III

Третья глава посвящается исследованию конечных ступеней устройств ФОН, которые в основном определяют погрешность, фазовые и нелинейные искажения всего устройства. Большие технические трудности обеспечения малых искажений амплитуды и фазы формируемого напряжения возникают при необходимости согласования выходного каскада устройства ФОН с лампой накаливания, активное сопротивление которой, как правило, мало и в лучшем

случае не превышает 100–150 ом. Применение согласующих трансформаторов ограничивает частотный диапазон устройства, особенно в области верхних частот.

В качестве выходного усилителя мощности в устройствах ФОН предложено использовать эмиттерный повторитель на высокочастотном транзисторе средней мощности, обладающий малыми частотными и нелинейными искажениями и низким выходным сопротивлением. Для исключения постоянной составляющей тока лампы накаливания использован разделительный конденсатор, а для согласования режимов транзистора по постоянному и переменному току в его эмиттерную цепь предложено включить токостабилизирующий частотонезависимый двухполюсник на транзисторе. Отсутствие усиления по напряжению в выходном каскаде компенсируется применением высококачественного усилителя на высокочастотных транзисторах в каскадном включении. В качестве регулирующего элемента использован комбинированный каскадный усилитель в цепи обратной связи, состоящий из низковольтного лампового триода и транзистора п-р-п типа. Такой усилитель обладает малыми нелинейными и частотными искажениями и является безинерционным как звено автоматического регулирования. Поскольку он относится к регуляторам I рода, то для обеспечения устойчивости системы условие (14) является необходимым, но недостаточным. Вводится дополнительное условие: функция

$$F(j\omega) = K' U_{\text{вх}} S_{R(\omega)} \varphi(j\omega) K_v(j\omega) \quad (15)$$

не должна охватывать точку $(-1, j0)$ при любых значениях $U_{\text{вх}}$.

Использование усилителя постоянного тока (УПТ) с большим коэффициентом усиления, а также нестабильного фоторезистора в цепи обратной связи неизбежно связано с появлением недопустимого дрейфа, вследствие которого УПТ оказывается в насыщении. Возникает большая погрешность формирования напряжения, поэтому необходима калибровка элементов цепи обратной связи, которая производится перед каждым измерением.

Ручная калибровка ухудшает эксплуатационные характеристики прибора. Предложена автоматическая быстродействующая калибровка с запоминающим элементом, действующая во время пауз между операциями формирования, которая в отличие от применявшихся ранее громоздких схем содержит всего два элемента – катодный повторитель и запоминающий конденсатор в его сеточной цепи. Опре-

делена погрешность устройства ФОН, вызванная дрейфом элементов цепи обратной связи при действии калибровки.

$$\delta_g U_{\text{вн}} = \frac{\delta R \cdot S_p \cdot R_{\text{ф}}}{\beta'_{\text{ас}} (1 + S_p K_{\Sigma}) (R_{\text{ф}} + R_{\text{а}})} \quad (16)$$

где δR – нестабильность элемента, приведенная ко входу УПТ.

Вследствие высокого значения коэффициента передачи цепи обратной связи в оконечной ступени на ее динамике сказывается действие остальных инерционных цепей: фильтров источника питания, разделительных цепей и т.д., влиянием которых можно было пренебречь при составлении дифференциальных уравнений в предварительных ступенях. Как правило, при введении в цепь обратной связи УПТ система становится неустойчивой, поэтому одновременно приходится вводить корректирующие средства, демпфирующие систему АРУ. Введение линейной интегрирующей цепочки заметно снижает быстродействие ступени. Использование обратных связей с конденсаторами исключается, так как при переключении ступени с формирования опорного напряжения на калибровку остаточные заряды этих конденсаторов изменяют напряжение на запоминающем конденсаторе, выводя тем самым схему калибровки из равновесия.

Как известно, при увеличении быстродействия системы за счет подъема верхних частот цепи АРУ одновременно усиливается влияние высокочастотных помех, что является недопустимым в устройствах ФОН.

Предложено для компромиссного сочетания высокой точности и удовлетворительного быстродействия устройств ФОН включить параллельно интегрирующему конденсатору линейной коррекции токостабилизирующий частотонезависимый, а последовательно с ним – нелинейный частотозависимый двухполюсники, осуществляющие стабилизацию разрядного и зарядного токов конденсатора в переходном процессе, в результате чего достигается подавление так называемых средних частот в канале АРУ.

В четвертой главе показано, что дальнейшее расширение пределов измерения и частотного диапазона АЦВ, построенных в соответствии с рассмотренным принципом, связано с повышением метрологических характеристик не только устройств ФОН. Значительные трудности возникают в связи с отсутствием прецизионных делителей опорного напряжения и входных делителей, работающих в широком диапазоне частот. Другой существенной проблемой является принципиальная сложность создания высокочувствительного быстродействующего устройства сравнения, обладающего также широкой полосой частот сравниваемых напряжений. Эта задача еще более усугубляется необходимостью сравнения переменных напряжений произвольной формы с большим коэффициентом амплитуды — пикфактором.

Дальнейшие исследования этого принципа позволили предложить новую структурную схему АЦВ, частотные характеристики и быстродействие которого определялись бы только устройством ФОН.

При более глубоком изучении рассмотренного принципа выяснилось, что использование устройства ФОН только для целей формирования опорного напряжения и выполнения им как бы некоторой предварительной операции в процессе измерения далеко не полностью раскрывает все его потенциальные возможности. Действительно, в процессе формирования опорного напряжения строго определенного уровня из измеряемого, величина которого принимает произвольные значения, коэффициент передачи устройства ФОН всегда приходит в однозначное соответствие этой произвольной величине измеряемого напряжения. Таким образом, уже к началу процесса уравнивания измеряемого и опорного напряжений устройство ФОН содержит в себе достаточную информацию об интересующем нас действующем значении измеряемого напряжения. Поэтому эту операцию уравнивания, которая в несколько раз превосходит по длительности операцию формирования, можно рассматривать не как основную после завершения подготовительной операции ФОН, а как вспомогательную, предназначенную только для представления интересующей нас информации в цифровой форме.

Измерить же переменный параметр устройства ФОН — его коэффициент передачи K_v — можно значительно более точными и бы-

стродействующими средствами. В частности, для этого может быть использован вспомогательный генератор тестового напряжения фиксированной частоты с разделением измеряемого и тестового сигналов по любому из известных способов. Предложена и описана структурная схема автоматического цифрового милливольтметра переменного тока, в котором использовано временное разделение измеряемого и тестового сигналов.

Использование достаточно высокой частоты тестового напряжения, выбранной в середине частотного диапазона прибора, позволяет резко уменьшить инерционность фильтров устройства сравнения и тем самым существенно повысить быстродействие прибора.

Устранение необходимости уравнивания во всем диапазоне частот измеряемых напряжений снимает жесткие требования к широкополосному усилителю устройства ФОН в отношении изменений формы его выходного напряжения за счет фазовых искажений. Сохраняется лишь условие точного сравнения на компарирующем преобразователе его действующего значения с образцовым напряжением U_0 . В результате отпадает необходимость решения самой сложной задачи — коррекции фазово-частотных характеристик усилителей в широком частотном и динамическом диапазонах. Становятся ненужными широкополосное устройство сравнения и широкополосный прецизионный делитель, который еще не разработан в настоящее время. Наконец, появляется простая возможность расширения пределов измерения АЦВ как в сторону малых, так и больших напряжений:

а) в первом случае на вход тракта ФОН включаются дополнительные линейные широкополосные усилители с постоянными коэффициентами усиления, примерно равными кратности расширения пределов измерения (в 10^n раз);

б) во втором случае за счет применения нестабильных и неточных входных делителей напряжения, способных однако работать в широком диапазоне частот.

Длительная временная и температурная нестабильность этих усилителей и делителей "выбирается" системой АРУ и не сказывается на точности приборов.

Для получения высокой точности прибора, по-прежнему, необходимо обеспечить малые нелинейные и амплитудно-частотные искажения в тракте формирования, а также запомнить с малой погрешностью величину коэффициента передачи устройства ФОН K_v на

время его измерения.

Постоянная времени разряда запоминающего конденсатора

$$T_n \geq \frac{t_u}{\ln \frac{1}{1 - \delta_n U_{on} \left(\frac{S_{p0}}{S_p E_p} - 1 \right)}} \quad (17)$$

где t_u - время измерения коэффициента передачи,

δU_{on} - погрешность запоминания.

Таким образом, возникает задача создания схем устройств ФОН, коэффициент передачи которых после окончания процесса формирования напряжения может запоминаться и сохраняться с малой погрешностью на время его измерения.

Введение памяти в различные ступени (предварительные и окончные) имеет свои специфические особенности и для каждой из них рассматривается в отдельности. Однако математический аппарат, разработанный в диссертации для анализа обычных устройств ФОН, не претерпевает каких-либо существенных изменений в приложении его к схемам ФОН с памятью.

Как отмечалось при описании калибровки, элементы памяти содержатся уже в обычных вариантах схем устройств ФОН. Эту роль частично выполняет конденсатор линейной корректирующей цепочки, демпфирующей систему АРУ в оконечной ступени, что позволяет сократить время повторного формирования примерно того же напряжения за счет запоминания предыдущего состояния. Следовательно, она может быть преобразована в оконечную ступень устройства ФОН с памятью, при этом на элементы частотной коррекции цепи АРУ накладывается дополнительное условие (17), если демпфирующий конденсатор одновременно используется и как элемент памяти.

Значительно сложнее осуществить запоминание коэффициента передачи в предварительных ступенях ФОН. В работе указано два основных направления, в которых могут совершенствоваться такие схемы.

Во-первых, задачу запоминания коэффициента передачи в предварительных ступенях можно свести к решению подобной задачи в оконечных ступенях устройств ФОН, если ввести в цепь параметрической обратной связи какой-либо запоминающий элемент для поддержания режима регулирующего элемента, установившегося к

моменту размыкания обратной связи. Если использовать в качестве компарирующего преобразователя и регулирующего элемента фотоэлектрические преобразователи, наиболее полно отвечающие на сегодня условиям применения их в предварительной ступени, то получится система АРУ, по крайней мере, 5-го порядка (инерционные элементы: два фоторезистора, две лампы накаливания и запоминающий элемент). Анализ показал, что в ней недостижимо одновременное сочетание высокой статической точности и большого быстродействия. Очевидно, создание удовлетворительного варианта такой схемы будет прежде всего связано с появлением безинерционных регуляторов с широким динамическим диапазоном.

К положительным качествам этой схемы относятся отсутствие динамической погрешности прибора за счет изменений входного напряжения в течение времени, когда производится измерение коэффициента передачи устройства, а также относительная простота схемы.

Во-вторых, для запоминания коэффициента передачи может быть использовано так называемое "регулирование вперед" со стороны измеряемого напряжения U_x в широкополосном усилителе с не зависящим от U_x входом. Сущность его заключается в следующем. Измеряемое напряжение поступает одновременно на два идентичных широкополосных регулируемых усилителя, причем, параметрической обратной связью охвачен только один из них, а регулирующее воздействие АРУ подается на оба усилителя. Таким образом, во втором усилителе коэффициент передачи непосредственно не зависит от величины входного напряжения и не изменяется при переключении его входа с измеряемого напряжения на вспомогательное, однако величина его коэффициента передачи всегда соответствует в определенной мере уровню измеряемого напряжения. К выходу этого усилителя, образующего первую ступень формирования, подключается оконечная ступень точного формирования, память в которой организована по первому способу с конденсатором.

Подбирая специальным образом параметры усилителей можно получить при сопряжении их амплитудных и регулировочных характеристик упомянутую выше S-образную выходную характеристику второго усилителя, допуская в нем некоторое перерегулирование. Сопряжение "по трем точкам" осуществляется за счет введения трех степеней свободы схемы:

1) изменения величины шунта, включенного параллельно регу-

308927

- дирующему фоторезистору второго усилителя;
- 2) изменения коэффициента деления его входного напряжения;
 - 3) изменения максимального коэффициента усиления первого усилителя (обычно изменением величины сопротивления нагрузки).

Технические характеристики устройств ФОН:

1. Уровень входных напряжений 10 ± 160 мВ.
2. Действующее значение опорного напряжения переменного тока $I,6$ В при коэффициенте амплитуды не менее 4.
3. Статическая ошибка формирования $\pm 0,03\%$ в диапазоне частот 45 Гц ± 100 кГц.
4. Нелинейные искажения $0,6 \pm 0,8\%$.
5. Время формирования при максимальном перепаде входного напряжения не более 1 сек. Время формирования при 10%-ном перепаде входного напряжения 0,2 сек.
6. Время запоминания при погрешности 0,01% около 5 сек. (при окружающей температуре 20°C).
7. Источники питания: $(-27 \pm 0,1\%)$ в х $0,45$ А; накал $6,3$ В х $0,35$ А

В приложении к диссертации даны рекомендации по проектированию и поверке устройств ФОН, приведены технические характеристики фазометра звуковых частот с повышенной разрешающей способностью ($2'$ на шкалах $\pm 50'$ и $180^\circ \pm 50'$), разработанного для настройки устройств ФОН.

На основе устройств ФОН с запоминанием коэффициента передачи изготовлен лабораторный макет автоматического цифрового милливольтметра переменного тока, предварительные технические данные которого следующие:

- а) время измерения 0,5 - 1 сек;
- б) погрешность измерения на основном пределе $(0,2-0,5)\%$ $\pm 0,1$ мВ.

З а к л ю ч е н и е

Основные результаты работы сводятся к следующему:

I. Дана сравнительная оценка существующих вариантов схем устройств ФОН с точки зрения их быстродействия, погрешности формирования, частотного и динамического диапазонов. Наиболее пер-

спективными оказываются устройства ФОН, содержащие две ступени формирования - предварительную и окончную.

2. Разработаны принципиальные схемы предварительных ступеней с расширенным частотным и динамическим диапазонами, в которых для повышения коэффициента стабилизации опорного напряжения использована дополнительная цепь положительной параметрической обратной связи.

3. Найдено условие согласования параметров фоторезисторов при использовании их в качестве инерционных регуляторов в транзисторных схемах.

4. Получены аналитические выражения для коэффициента стабилизации и времени установления предварительной ступени, имеющей две цепи параметрической обратной связи - отрицательной и положительной - и одну цепь безинерционной отрицательной обратной связи, изменением глубины которой осуществляется регулировка коэффициента передачи ступени.

5. Разработаны новые схемы безинерционных регулирующих элементов I рода на основе комбинированного каскадного усилителя и нелинейного управляемого сопротивления на транзисторе, причем по статическим свойствам последний приближается к регулиющему элементу II рода.

6. Предложена схема автоматической калибровки окончной ступени, содержащая запоминающий элемент, которая снижает погрешность формирования опорного напряжения.

7. Разработаны нелинейные корректирующие средства, содержащие токостабилизирующие частотозависимые и частотнезависимые двухполюсники, использование которых повышает быстродействие и устойчивость окончной ступени устройств ФОН.

8. Проведено дальнейшее исследование АЦВ с устройствами ФОН и предложена более совершенная структурная схема прибора, основанная на принципе измерения переменного параметра устройства ФОН - его коэффициента передачи с помощью источника вспомогательного напряжения.

9. Разработаны устройства ФОН с запоминанием коэффициента передачи, необходимые для реализации указанного принципа, которые обладают погрешностью $\pm 0,03\%$ в диапазоне частот 45 Гц ± 100 кГц при коэффициенте амплитуды не менее 4. Диапазон входных напряжений 10 ± 160 мВ.

10. Предложена методика получения S - образной амплитуд-

ной характеристики устройств ФОН и сопряжения ее с идеальной характеристикой "по трем точкам", при котором коэффициент стабилизации устройства оказывается наибольшим.

II. Для испытаний устройств ФОН разработан электронный фазометр звуковых частот с повышенной разрешающей способностью, который может найти самостоятельное применение в измерительной практике.

Материалы диссертационной работы докладывались на научно-технической конференции молодых ученых СО АН СССР и специалистов г.Новосибирска (1966 г.) и изложены в следующих работах:

1. Изыскание рациональных методов создания цифровых вольтметров для измерения действующих значений напряжений произвольной формы в диапазоне звуковых частот. ИАЭ СО АН СССР, ротапринт, г.Новосибирск, 1966 г. (Отчет по теме шифр "Вопрос", для служебного пользования, не подлежит публикации в открытой печати).
2. Ю.Ф. Чусовков (в соавторстве с В.Е. Колесовым, Ю.А. Соломиным). Фазометр звуковых частот с повышенной разрешающей способностью, Передовой научно-технический и производственный опыт, № 18-66-1494/117, ГосИНТИ, Москва, 1966 г.
3. Ю.Ф. Чусовков (в соавторстве с В.М. Беловым, А.М. Ковалевым, И.И. Коршевером). Цифровые приборы переменного тока. Конференция молодых ученых СО АН СССР и специалистов г.Новосибирска, секция "Автометрия, автоматическое управление и вычислительная техника" (тезисы докладов), г.Новосибирск, 1966.
4. Изыскание рациональных методов создания цифровых вольтметров для измерения действующих значений напряжений произвольной формы в диапазоне звуковых частот. ИАЭ СО АН СССР г.Новосибирск, 1965 г. (Промежуточный отчет по теме шифр "Вопрос", для служебного пользования, не подлежит публикации в открытой печати).
5. Современное состояние полупроводникового приборостроения в СССР и за рубежом. (Обзор). ИЭТИ - предприятие п/я 55, Новосибирск, 1963. (Отчет по теме А-16-68, для служебного пользования).
6. Ю.Ф. Чусовков (в соавторстве с Н.Е. Ефаниным). Стабилизированный выпрямитель с импульсноуправляемыми вентилями. Радиотехника и электроника. Труды ИЭТИ, вып. I, Зап.-Сиб. кн. из-во, Новосибирск, 1965.

7. Ю.Ф. Чусовков. Стабилизированный выпрямитель с умножением выпрямленного напряжения. Сб. Автоматический контроль и методы электрических измерений. Труды УИ Всесоюзной конф. , Наука, Новосибирск, 1967.
8. Ю.Ф. Чусовков. Способ стабилизации напряжения выпрямителя. Авторское свид. СССР № 146385, класс 2I_{д2}, 2_{оз}, приоритет от 10 июля 1961 г. Бюллетень изобретений, 1962, № 8.
9. Ю.Ф. Чусовков (в соавторстве с И.Ф. Клисториным). Широкополосное устройство формирования периодических опорных напряжений произвольной формы. Решение о выдаче авторского свидетельства по заявке № 1047262/26-10, класс 2Ie, 28₀₁, приоритет от 30 декабря 1965 г.
10. Ю.Ф. Чусовков (в соавторстве с И.Ф. Клисториным, В.М. Беловым, А.М. Ковалевым). Автоматический цифровой милливольтметр переменного тока. Решение о выдаче авторского свидетельства по заявке № 1066619/26-10, класс 2Ie, 36₀₁, приоритет от 26 марта 1966 г. (не подлежит публикации в открытой печати).

Ротапринт Института математики СО АН СССР
Заказ 937. Тираж 60 экз.

Новосибирск, 90