

6
A67

ВСЕСОЮЗНЫЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ ИМ.Д.И.МЕНДЕЛЕЕВА

на правах рукописи

Е.З.ШАПИРО

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ И РАЗРАБОТКА
ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ
ДЛЯ ПОВЕРКИ ВАТТМЕТРОВ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

Специальность 05.246 - Электроизмерительная техника

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ленинград
1972

Работа выполнена по Всесоюзному ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательскому институту метрологии им. Д. И. Менделеева

Научный руководитель: кандидат технических наук, старший научный сотрудник А. Я. БЕЗИКОВИЧ.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Т. Б. РОЖДЕСТВЕНСКАЯ
кандидат технических наук, старший научный сотрудник С. М. ПИГИН.

Автореферат разослан "15" IV 1972 г.

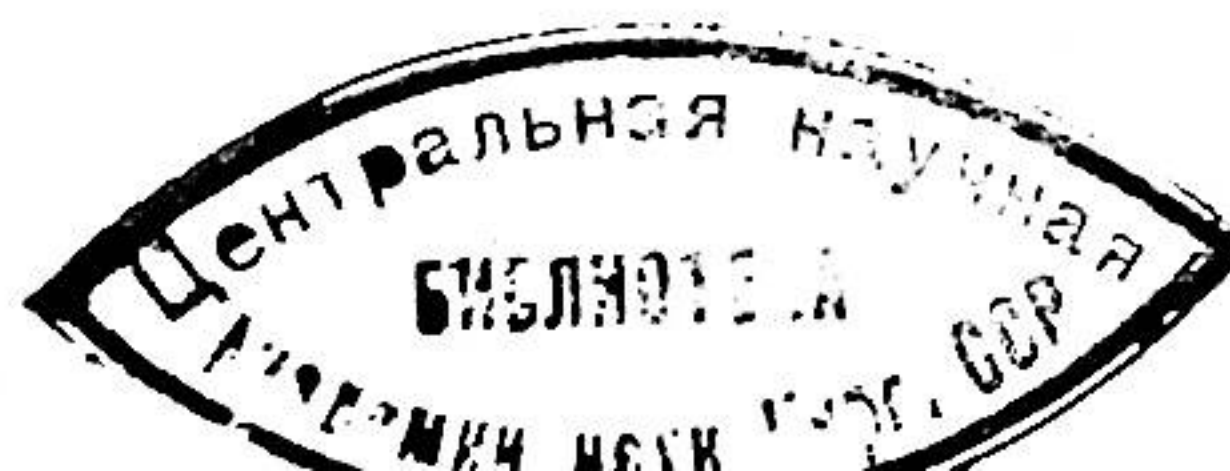
Защита диссертации состоится "13" мая 1972 г.
на заседании совета Всесоюзного ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательского института метрологии им. Д. И. Менделеева
г. Ленинград, Московский пр., 19, зал заседаний.

Отзыв на автореферат диссертации просьба направлять в двух экземплярах по адресу: г. Ленинград, Л-5, Московский пр., 19, ВНИИМ им. Д. И. Менделеева.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА

К. Т. И.

(Смолич С. А.)



Развитие ряда областей современной науки и техники предъявляет повышенные требования к точности средств измерения активной мощности переменного тока и широте охватываемых ими диапазонов частот и коэффициентов мощности. Приборостроительными предприятиями страны и рядом зарубежных фирм проводится интенсивная разработка и выпуск новых типов ваттметров различных систем. Разработка новых ваттметров высокой точности в настоящее время существенно сдерживается возможностями образцовой аппаратуры, предназначенной для их аттестации. Созданная в начале 60-х годов во ВНИИМ образцовая аппаратура — термоэлектрический компаратор мощности, обеспечила поверку основных видов ваттметров, выпускавшихся промышленностью тех лет, однако современное приборостроение и метрологическая практика выдвинули ряд новых требований, которым существующая аппаратура уже не удовлетворяет. Основными из них являются:

- увеличение точности образцовой аппаратуры при $\cos \varphi < 0,5$,
- обеспечение комплектной поверки ваттметров со связанными цепями тока и напряжения,
- значительное повышение производительности труда при поверке ваттметров.

Первые два требования обусловлены необходимостью освоения малокосинусных ваттметров звукового диапазона частот, в том числе ваттметров электронной системы высоких классов точности. Послед-

нее требование связано с непрерывно возрастающим объемом поверочных работ, в связи с чем вопрос производительности приобретает большое народнохозяйственное значение.

Повышение точности и производительности является общей задачей при создании образцовой аппаратуры постоянного и переменного тока, однако пути ее решения в каждом случае существенно различны. Так, если при измерении величин постоянного тока достигнутая точность сравнения измеряемой величины с мерой нередко соизмерима с точностью меры и дальнейший прогресс в этой области связан уже с повышением точности эталонов электрических величин, то величины переменного тока, в особенности мощность, измеряются со значительно меньшей точностью, что обусловлено наличием в цепи сравнения их с мерами постоянного тока дополнительного звена — измерительного преобразователя величин переменного тока, являющегося органом их сравнения. Главный резерв повышения точности измерений на переменном токе лежит в совершенствовании именно этого звена аппаратуры. Повышение производительности работ при поверке приборов постоянного и переменного тока также достигается различными путями. При наличии быстродействующих цифровых вольтметров постоянного тока наиболее длительной операцией в первом случае является установка указателя поверяемого прибора на необходимую отметку шкалы. Существенный выигрыш в производительности, наряду с повышением точности и объективности, здесь дает полная автоматизация процесса поверки, включающая в себя и автоматизацию отсчитывания показаний со шкал поверяемых приборов.

При поверке приборов переменного тока от 80 до 100% времени занимают операции измерения действительного значения входной величины и вычисления погрешности поверяемого прибора. Очевидно, первым этапом повышения производительности поверки в данном случае должно стать создание полуавтоматической образцовой аппаратуры, в которой автоматизированы процессы измерения входных величин и средства обработки информации.

Сказанное позволяет сформулировать задачи диссертации следующим образом:

1. Теоретическое и экспериментальное исследование погрешностей перехода измерительных преобразователей мощности (ИПМ) и разработка новых видов ИПМ и методов компарирования, при которых погрешность перехода минимизируется;

2. разработка и исследование ИПМ со связанными цепями тока и напряжения;

3. анализ возможных путей построения автоматических средств измерения мощности и вычисления погрешности поверяемого ваттметра;

4. создание высокопроизводительной полуавтоматической аппаратуры для поверки ваттметров классов 0,1-1 в звуковом диапазоне частот.

Теоретическое исследование погрешностей ИПМ сравнения

Основное внимание в реферируемой работе уделено исследованию погрешности ИПМ, обусловленной неидеальностью характеристик эле-

ментов, из которых он состоит (γ_n). Теоретическое исследование этой погрешности проведено для двух видов ИПМ, непосредственно реализующих функцию произведения входных величин, и ИПМ, использующих элементы с квадратичными характеристиками.

Каждому из названных видов ИПМ соответствуют два варианта функциональных схем, содержащих идеальный функциональный преобразователь (ФП), нелинейный элемент (НП), имитирующий неидеальность характеристики ФП, и интегратор сигнала, пропорционального мгновенной мощности (И). В первом варианте функциональных схем (ИПМ группы а) НП располагается до интегратора, а в другом (ИПМ группы б) - после интегратора. Анализ предложенных функциональных схем позволил получить выражения для погрешностей обоих рассматриваемых видов ИПМ каждой из групп:

для ИПМ группы а -

$$\gamma_{H_a} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!} \int_0^T (-1)^n C_m^n \frac{1}{\cos^n \varphi} \cos(2\omega t + \varphi) dt \quad (1)$$

$$\gamma_{H_a} = \frac{1}{K_2 P_0} \left\{ \sum_{m=2}^{\infty} (A^{2m} - B^{2m}) \left[1 + \frac{1}{T_0} \int_0^T C_m^n \cos^n(2\omega t + \varphi) dt \right] - \sum_{m=2}^{\infty} (A_0^{2m} - B_0^{2m}) \right\} \quad (2)$$

для ИПМ группы б -

$$\gamma_{H_b} = 0 ; \gamma_{H_b} = \frac{1}{K_2 P_0} \sum_{m=2}^{\infty} K_{2m} (A^{2m} - A_0^{2m} + B^{2m} - B_0^{2m}) \quad (3)$$

где m ($2m$) - степень полинома, аппроксимирующего неидеальную характеристику функционального преобразователя ИПМ,

C_m^n - биномиальный коэффициент

$A, A_0; B, B_0$ - значения сигналов переменного и постоянного тока пропорциональные сумме и разности входных сигналов ИПМ соответственно.

Полученные выражения показывают, что ИПМ группы а, к которым относятся, например, гальваномагнитные и диодные ИПМ, присуща инструментальная погрешность γ_{H_0} , $\gamma_{H_{02}}$, вызванная искажением формы сигнала мгновенной мощности. В ИПМ группы б, где интегратор физически совмещен с функциональным преобразователем (электромеханические или электротепловые ИПМ), погрешность перехода, как следует из (3), либо равна нулю, либо может быть устранена методически при условии, что $A = A_0$ и $B = B_0$. Этот вывод позволил классифицировать существующие ИПМ, приняв в качестве основного классификационного признака наличие внутреннего или внешнего интегратора. В диссертации рассмотрены основные параметры ряда ИПМ с внутренним интегратором, в результате чего показано, что наиболее перспективными из них для создания образцовой аппаратуры являются ИПМ с термоэлектрическими функциональными преобразователями.

Теоретический анализ погрешностей перехода показал, что для ИПМ, в отличие от ИП тока и напряжения, характерна специфическая составляющая погрешности, обусловленная неоднозначностью функции преобразования ИПМ, что связано с особенностью измеряемой величины-мощности, одно и то же значение которой может быть представлено различными соотношениями входных сигналов. Теоретически показано и экспериментально подтверждено, что в термоэлектрических ИПМ (ТИПМ) неоднозначность функции преобразования является следствием изменения тепловых режимов термопреобразователей (ТП) при замене переменного тока постоянным и следствием асимметрии "мостового" сумматора токов ТИПМ. В работе

показано, что погрешности компарирования, вызванные неидентичностью ТП (γ_P), неквадратичностью их характеристик (γ_2) и конечным значением ТКС нагревателей (γ_3), могут быть представлены в виде произведения двух сомножителей, одним из которых является изменение температуры ТП в ходе компарирования, а другой обусловлен неидеальностью характеристик ТП.

$$\gamma_{P_1} = \pi_1 \frac{\gamma_P}{P_0} \Delta \theta, \quad \gamma_{P_2} = \pi_2 \frac{b}{\alpha P_0 (1 - 2b/\alpha P_0)} \Delta \theta$$

$$\gamma_{P_3} = \pi_3 Z_{th} \Delta \theta \quad (4)$$

где γ_K - относительная неидентичность ТП,
 α и b - коэффициент полинома, аппроксимирующего реальную характеристику ТП,
 Z_{th} - Т.К.С. нагревателя ТП и P_0 значение компарируемой мощности.

При принятой методике компарирования, когда постоянное напряжение (U) устанавливается равным переменному (U), температура каждого из ТП в ходе одного измерения изменяется на

$$\Delta \theta = I_{L_0} \left(\frac{1}{\cos^2 \varphi} - 1 \right) \quad (5)$$

Указанные погрешности, как следует из (4), (5), резко возрастают при уменьшении $\cos \varphi$, что хорошо согласуется с экспериментальными данными. Они могут быть полностью устранены при условии $\Delta \theta = 0$, т.е. при условии стабилизации избыточной температуры каждого из нагревателей в ходе компарирования. Те же погрешности могут быть уменьшены и за счет улучшения параметров ТП, од-

нако, полученный вывод позволил отказаться от этого пути, связанного с серьезными технологическими трудностями.

В реферируемой работе проведен анализ погрешностей компарирования, вызванных асимметрией мостовой цепи ТИПМ. Асимметрия мостовой цепи нарушает независимость цепей источников тока и напряжения и приводит к изменению коэффициентов первичного преобразования этих величин ρ_L и ρ_u . Если внутренние сопротивления источников тока и напряжения на постоянном и переменном токе одинаковы $R_{u_0} = R_{u_1}$ и $R_{L_0} = R_{L_1}$, то, возникающая погрешность компарирования

$$\gamma_{a_1} = \rho_L \Delta \rho_L \frac{I^2 (\cos^2 \varphi - 1)}{P_0} \quad (6)$$

устраняется при условии $\Delta \vartheta = 0$. Практически $R_{u_0} \neq R_{u_1}$ и $R_{L_0} \neq R_{L_1}$. В этом случае возникает дополнительная погрешность γ_{a_2} , не устранимая методическим путем и равная

$$\gamma_{a_2} = \sigma^2 (1+C)^2 \left\{ C \left[4 \frac{R_u}{Z} + \left(4 + \frac{Z}{R_u} \right) (1+C) \right]^{-1} \frac{dR_u}{R_u} + \right. \\ \left. + \left[(1+C) \frac{2R_i}{Z} + 4C \left(1+C + \frac{ZC}{R_i} \right) \right]^{-1} \frac{dR_i}{R_i} \right\} \quad (7)$$

где σ — степень асимметрии мостовой цепи, равная отношению приращению напряжения в одной диагонали моста, если источник напряжения подключен к другой,

Z — сопротивление нагревателя,

C — отношение плеч моста.

Полученные выражения погрешностей γ_{a_1} и γ_{a_2} позволили рассчитать допустимую степень асимметрии σ при заданной погрешности компарирования и дать практические рекомендации по ее уменьшению.

Методы уменьшения неоднозначности функции преобразования ТИПМ и возможные пути их реализации

Для уменьшения погрешностей, вызванных изменением тепловых режимов термопреобразователей, в диссертации предложен ряд методов стабилизации температуры нагревателей. Один из таких методов, который может быть реализован на существующем оборудовании состоит в подборе необходимых отношений $N = \frac{I_u}{I_L}$ при которых $\Delta \vartheta = 0$ для каждого значения $\cos \varphi$. Эти отношения

$$N = \sqrt{\frac{n^2 + 1 + \sqrt{n^2 + 1 - (2n \cos \varphi)^2}}{2n^2}} \quad (8)$$

где $n = \frac{I_{u_0}}{I_{L_0}}$ получены из системы уравнений, связывающих условия равенства мощностей и температур на переменном и постоянном токе. Экспериментальная проверка методики компарирования с использованием таблицы значений N на установке УКТЗ-1 показала, что погрешности γ_{p_1} и γ_{p_2} уменьшаются на 2 порядка, однако автоматический компаратор, реализующий данную методику оказывается неоправданно сложным. Более простое решение той же задачи обеспечивают методы искусственной стабилизации температуры нагревателей. В работе рассмотрены два варианта ТИПМ (неавтоматический и автоматический), в которых стабилизация температуры достигается путем пропускания вспомогательного постоянного тока по дополнительным нагревателям каждого из ТП. В ТИПМ с автоматической стабилизацией температуры для этой цели применена следящая система, поддерживающая неизменной э.д.с. одного из термопреобразователей E_1 . При условии, что разность э.д.с. $ТП_1$ и $ТП_2$ на переменном и постоянном токах одинакова, это соответствует тому,

что и $\mathcal{E}_2$ в ходе компарирования не изменяется, т.е. $\Delta \mathcal{E} = 0$. Анализ уравнения преобразования такого ТИПМ показал, что при произвольной форме характеристик ТП, его функция преобразования однозначна. Экспериментальное исследование подтвердило теоретический вывод - погрешности, вызванные неидентичностью и неквадратичностью характеристик ТП, уменьшаются более чем на 2 порядка.

Нарушение симметрии мостовой цепи ТИПМ, вызывающее погрешности χ_{a_1} и χ_{a_2} , в основном обусловлено изменением сопротивления нагревателей ТП, в которых происходит выделение тепла. Асимметрия может быть значительно уменьшена при условии разделения операций суммирования входных сигналов и возведения полученных суммы и разности в квадрат между отдельными элементами ТИПМ. Практическая реализация этого условия привела к необходимости введения в цепь связи сумматора с термопреобразователями широкополосных электронных усилителей с высоким входным и низким выходным сопротивлениями, позволивших не только устранить погрешности χ_{a_1} и χ_{a_2} , но и предложить ряд структурных схем ТИПМ, обладающих новыми признаками, в частности: ТИПМ со связанными цепями тока и напряжения и ТИПМ одновременного сравнения.

Измерительные преобразователи мощности с электронными усилителями во входных и выходных цепях

В диссертации предложено шесть основных вариантов структурных схем ИПМ с электронными усилителями (ЭТПМ), реализующих сумму разностный метод получения произведения и отличающихся друг от друга видом сумматоров входных сигналов. В результате их ана-

лиза показано, что ЭТПМ с пассивными сумматорами (мостовым и Т-образным) не пригодны для поверки электронных ваттметров и измерения мощности в цепи реальной нагрузки, так как требуют изоляции цепей тока и напряжения; ЭТПМ с активными сумматорами токов или напряжений допускают связь цепей источников, однако для их реализации в цепь одного из входных сигналов должен быть введен инвертор, вносящий структурную неидентичность в каналы преобразования суммы и разности, а также дополнительную частотную и угловую погрешности.

В работе предложена структурная схема ЭТПМ (рис.1) реализующая функцию произведения путем вычитания квадрата разности входных сигналов из суммы их квадратов. При условии, что коэффициенты усиления согласующих усилителей CU_1 и CU_2 одинаковы, а их выходные сопротивления ($R_{вых\,cu}$) малы по сравнению с сопротивлениями нагревателей, э.д.с. ТП, пропорциональна сумме квадратов входных сигналов $E_1 = K_{cu} n (U_a^2 + U_c^2)$, а э.д.с. ТП₂ - квадрату их разности $E_2 = K_{cu} n (U_a^2 + U_c^2 - 2 U_a U_c \cos \varphi)$. Напряжение по выходе ЭТПМ - U_b в этом случае равно

$$U_b = K_{cu} K_{cu} n 2 U_a U_c \cos \varphi, \quad (9)$$

где K_{cu} и n - коэффициенты передачи выходного усилителя (ВУ) и ТП соответственно. Уравнение преобразования сигналов постоянного тока, поступающих на те же входы, аналогично (9). Цепи источников тока и напряжения ЭТПМ (рис.1) связаны, а каналы их преобразования структурно идентичны. Благодаря этому обеспечивается повышение точности компарирования по сравнению с преобразователями, основанными на сумма-разностном методе. Применение такого ЭТПМ решает задачу поверки ваттметров со связанными цепями

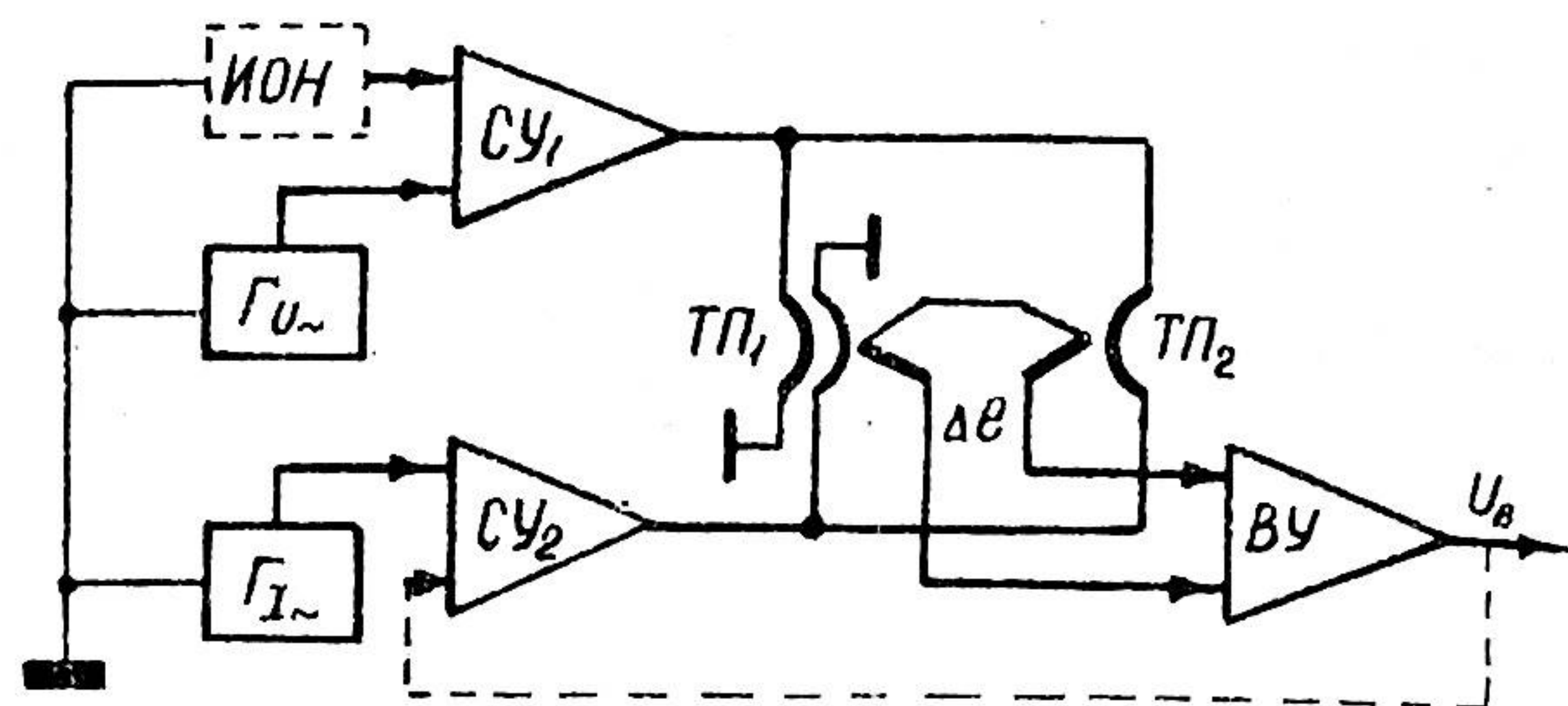


Рис 1

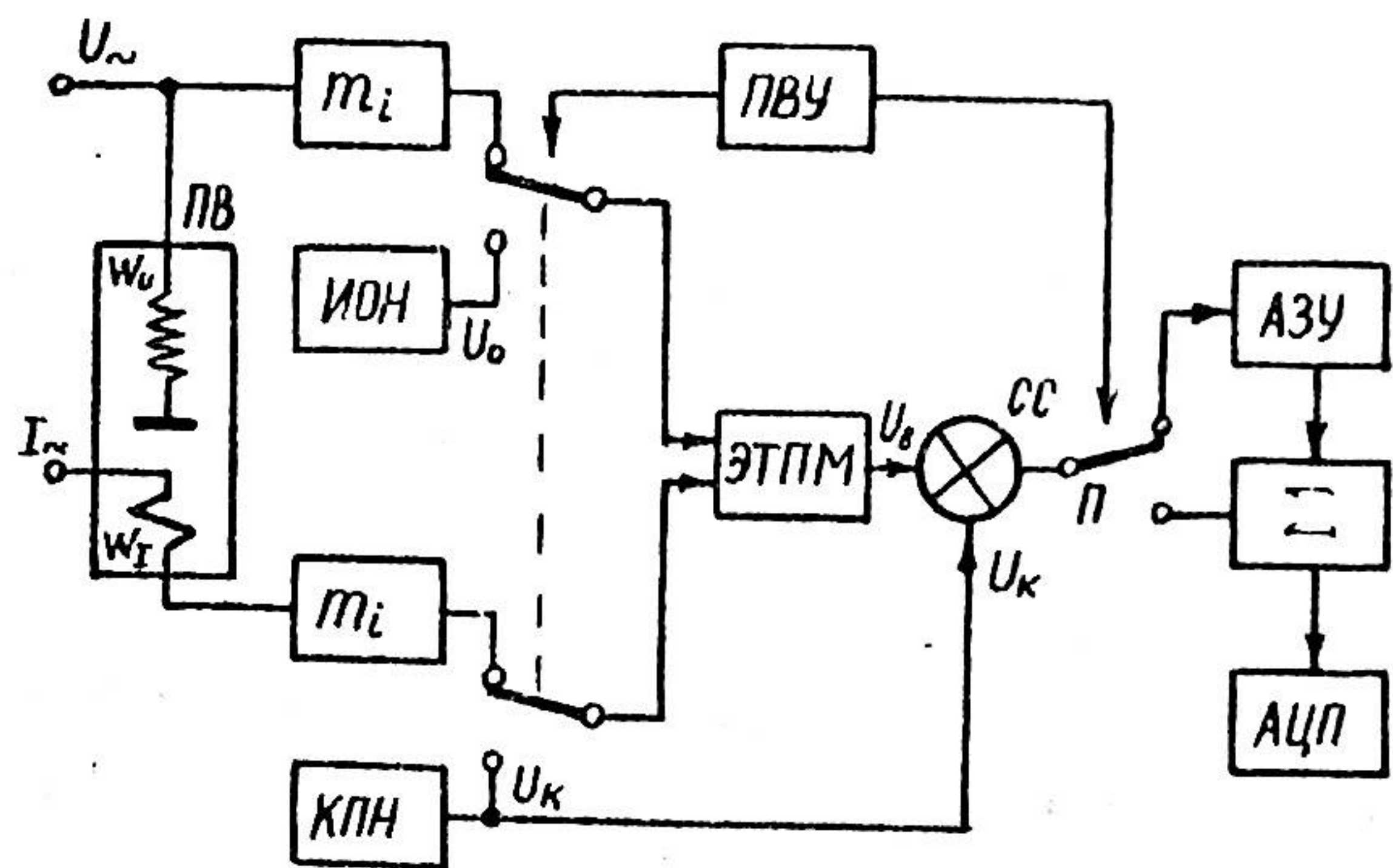


Рис 2

тока и напряжения.

На основе рассмотренной структуры в работе предложен метод одновременного сравнения двух мощностей переменного тока, представленных входными сигналами различных частот $U_u(\omega)$, $U_i(\omega)$ и $U_u(\Omega)$, $U_i(\Omega)$. Показано, что, если угол сдвига фаз между $U_u(\omega)$ и $U_i(\omega)$ $-\frac{\pi}{2} < \varphi < \frac{\pi}{2}$, а между $U_u(\Omega)$ и $U_i(\Omega)$ $\frac{\pi}{2} < \varphi < -\frac{\pi}{2}$, то равенство нулю выходного сигнала ЭТПМ при одновременном действии 4-х входных сигналов, соответствует равенству мощностей $P(\omega) = P(\Omega)$. Частным случаем этого метода является метод одновременного сравнения мощностей постоянного и переменного тока, легко поддающийся автоматизации и позволивший создать быстродействующий ЭТПМ сравнения для цифровых ваттметров высокой точности. Изменения в схеме, необходимые для реализации автоматического ЭТПМ одновременного сравнения, показаны пунктиром на том же рис.1. В схему вводится источник опорного напряжения (ИОН), напряжение которого U_0 подается на второй вход $СУ_1$ и суммируется с U_u , а выходное напряжение U_b подается на второй вход $СУ_2$, где суммируется с U_i . Если пренебречь погрешностью статизма, в образованной таким образом замкнутой системе, то напряжение на ее выходе U_b прямо пропорционально произведению входных сигналов

$$U_0 U_b = K U_u U_i \cos \varphi \quad (10)$$

Быстродействие ЭТПМ одновременного сравнения за счет глубокой внутренней обратной связи возрастает в несколько раз по сравнению с быстродействием ЭТПМ разомкнутого типа.

В работе проведен теоретический анализ погрешностей ЭТПМ,

вызванных неидеальностью параметров согласующих и выходного усилителей. В частности, исследованы частотные погрешности, обусловленные входным сопротивлением и входной емкостью СУ, входным сопротивлением СУ и емкостью шунтирующей нагревателя ТП, угловые погрешности ЭТМ, погрешности вызванные дрейфом нуля и шумами СУ и ВУ. Проведенное исследование позволило сформулировать основные требования к параметрам электронных усилителей и обосновать выбор их схемных и конструктивных решений. Наиболее жесткие и противоречивые требования предъявляются к согласующим усилителям, которые должны обладать широкой полосой пропускания в сочетании с малым временным и температурным дрейфом нуля и высоким входным сопротивлением. Согласующий усилитель выполнен по дифференциальной схеме с непосредственными связями между каскадами и общей последовательной обратной связью (О.С.) по напряжению, обеспечивающей увеличение входного сопротивления и уменьшение частотной погрешности. Для уменьшения дрейфа нуля входной каскад СУ выполнен на интегральной микросхеме ИП1-А, используемой в режиме малых коллекторных токов, а первый каскад усиления - на микросхеме IUT22I.

Выходной усилитель ЭТМ выполнен по МДМ структуре с двухтактным модулятором на полевых МОП транзисторах и двухтактным демодулятором. При разработке этого усилителя предложен ряд технических решений, позволяющих получить малые значения временного и температурного дрейфа и низкочастотных шумов. Параметры согласующего и выходного усилителей, полученные в результате экспериментального исследования опытных образцов, приведены в таблице I.

ТАБЛИЦА I

№ пп	Наименование параметра	Значение параметра		Примечания
		СУ	ВУ	
1	Коэффициент усиления	600 ± 1	$10^6 \pm 1$	В зависимости от глубины О.С.
2	Нелинейность характеристики	$5 \cdot 10^{-3} \%$	$5 \cdot 10^{-3} \%$	
3	Входное сопротивление	$4 \cdot 10^6 \text{ Ом}$	10^7 Ом	При $K < 10$ для СУ и $K < 10^4$ для ВУ
4	Выходное сопротивление	$0,02 \text{ Ом}$	$0,02 \text{ Ом}$	
5	Входная емкость $C_{вх}$	$4 \cdot 10^{-12} \text{ ф}$	-	
6	Входной ток $I_{вх}$	$0,1 \text{ мкА}$	$0,001 \text{ мкА}$	
7	Дрейф нуля за 1 час	10 мкВ	-	
8	Дрейф нуля за 8 час	60 мкВ	1 мкВ	
9	Дрейф нуля за 100 час	-	3 мкВ	
10	Температурный дрейф	$8 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$	$0,5 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$	
11	Действующее значение шумов	10 мкВ	-	В полосе $(0 \div 10^6 \text{ Гц})$
12	Удвоенная амплитуда шумового сигнала	-	$0,02 \text{ мкВ}$	В полосе $1,5 \text{ Гц}$
13	Частотная погрешность	$0,01 \%$	-	$f = 100 \text{ кГц}$
14	Частотная погрешность при $K=10$	$0,03 \%$	-	

На основе разработанных усилителей создан и экспериментально исследован ЭТМ, соответствующий структурной схеме (рис.1). В работе предложена методика и разработано вспомогательное оборудование для исследования частотной и угловой погрешностей ЭТМ. Частотная погрешность ЭТМ определяется как относительное изменение его выходного напряжения при изменении частоты. Входные

цепи ЭТПМ при этом соединены между собой и подключены к генератору, напряжение на выходе которого поддерживается неизменным с помощью вспомогательного термопреобразователя. Определенная таким образом частотная погрешность, не превосходит 0,005% на частоте 20 кГц. Для определения угловой погрешности ЭТПМ включается как ваттметр в цепь нагрузки, образованной активным сопротивлением R_{φ} емкостью C_{φ} . Если напряжение на такой нагрузке поддерживать неизменным, то активная мощность, рассеиваемая в ней, и, следовательно, выходное напряжение ЭТПМ должны быть постоянны при любом значении емкости, т.е. при любом $\cos \varphi$. Угловая погрешность χ_{φ} определяется как относительное изменение выходного напряжения ЭТПМ при изменении $\cos \varphi$ от 1 до 0,1. В работе проведен анализ погрешности определения χ_{φ} , вызванной потерями в конденсаторе C_{φ} и влиянием входных цепей ЭТПМ, и получено выражение, позволяющее рассчитать χ_{φ} по результатам измерений:

$$\chi_{\varphi} = \frac{\Delta U_{\varphi}}{U_{\varphi}} - \operatorname{tg} \varphi (\operatorname{tg} \delta - \operatorname{tg} \omega R C_{\varphi}) \quad (\text{II})$$

где R сопротивление последовательной цепи ЭТПМ.

Погрешность χ_{φ} , определенная по предложенной методике, не превышает 0,03% при $\cos \varphi = 0,5$ и 0,1% при $\cos \varphi = 0,1$. Погрешность сравнения, вызванная асимметрией ТП на постоянном токе, определяется по обычной методике. В ходе её исследования установлено, что она существенно меняется в зависимости от взаимного расположения выводов нагревателей ТП. Экспериментально найдены условия, при которых погрешность асимметрии не превосходит 0,003%. Таким образом, погрешность ЭТПМ сравнения не превосходит 0,01% в диапазоне частот 20 Гц — 20 кГц при $\cos \varphi = 1$ и 0,1% при $\cos \varphi = 0,1$. С целью дальнейшего использования предложенного ЭТПМ в ваттметре непосредственной оценки исследованы также погрешности, которые в ходе компа-

рирования устранились: нелинейность функции преобразования при десятикратном изменении тока составляет $\pm 0,02\%$, нестабильность коэффициента преобразования в течение двух часов после калибровки не превосходит 0,03%. Полученные результаты показали возможность создания малокосинусного цифрового ваттметра кл. 0,2 при $\cos \varphi = 0,1$ и кл. 0,1 при $\cos \varphi = 1$.

Полуавтоматическая аппаратура для проверки ваттметров переменного тока и результаты ее экспериментального исследования

В диссертации предложено восемь основных вариантов структурных схем полуавтоматических установок, реализующих методы проверки с помощью образцовых автоматических приборов или образцовых многозарядных мер — калибраторов активной мощности:

- установки с ЭТПМ непосредственной оценки;
- установки с ЭТПМ разновременного и одновременного сравнения замкнутого типа;
- установки с ЭТПМ разновременного сравнения разомкнутого типа;
- установки с калибраторами мощности, содержащими ЭТПМ непосредственной оценки и ЭТПМ разновременного сравнения.

В каждой из предложенных схем находит отражение специфика поверочного оборудования, состоящая в том, что в отличие от измерительных систем, поверочные устройства предназначены для определения отклонения входного сигнала от некоторого известно-

го значения, соответствующего числу, указанному на поверяемой отметке шкалы, при ограниченном количестве таких значений. Это позволяет упростить аппаратуру и повысить ее точность, хотя требует введения дополнительных узлов: одного из видов запоминающих устройств (ЗУ) и сумматора (Σ). Для выбора оптимальной структуры установки в работе проведено сравнение возможных вариантов, исходя из следующих критериев: быстродействие, производительность поверки, точность и относительная сложность технического решения. Сравнение установок по быстродействию и производительности поверки показало, что, несмотря на существенную разницу в длительности одного измерения $0,5 + 5$ сек., время поверки одной числовой отметки ваттметра с учетом времени, необходимого для наведения указателя прибора на поверяемую отметку для всех видов аппаратуры отличается незначительно и составляет $11 + 13$ сек. Производительность полуавтоматической аппаратуры при этом более чем в 20 раз превышает производительность существующего оборудования.

При сравнении установок по точности погрешности узлов общих для различных установок приняты одинаковыми, что позволило оценить эффективность самих структурных схем.

В результате проведенного анализа показано, что наибольшая точность достигается в установках разомкнутого типа с ЭТПМ разновременного сравнения. Из трех вариантов таких установок, отличающихся в основном структурой узлов обработки информации, предпочтение отдано тому, в котором максимальное число операций осуществляется в аналоговой форме, что упрощает аппаратуру и увеличивает ее надежность. Структурная схема разработанной установки для полуавтоматической поверки ваттметров переменного тока с пределами

измерения по напряжению $1 \text{ мВ} - 600 \text{ В}$ и по току $100 \text{ мкА} - 10 \text{ А}$. Представлена на рис. 2. Поверка ваттметра (ПВ) производится в два такта. При совмещении указателя прибора с отметкой действительное значение входного сигнала составляет:

$$N_{\text{вх}} = N_0(1 + \gamma_{\text{пв}}) \quad (12)$$

где N_0 — значение $N_{\text{вх}}$ соответствующее числу, указанному на поверяемой отметке, $\gamma_{\text{пв}}$ — относительная погрешность ПВ.

Пропорциональное ему напряжение на выходе ЭТПМ ($U_{\text{в}}$) компенсируется в схеме сравнения (СС) напряжением $U_{\text{к}} = k m N_0(1 + \gamma_{\text{кпн}})$, получаемым от калибратора постоянного напряжения (КПН), и поступает в аналоговое запоминающее устройство (АЗУ), где по окончании первого такта измерения запоминается напряжение:

$$U_{\text{азу}} = k m N_0(\gamma_{\text{пв}} + \gamma_{\text{м}} + \gamma_{\text{к}} + \gamma_{\text{п}} + \gamma_{\text{кпн}}) \quad (13)$$

Здесь k — коэффициент преобразования ЭТПМ;

m — коэффициент преобразования масштабных преобразователей;

$\gamma_{\text{п}}$ — погрешность перехода ЭТПМ;

$\gamma_{\text{к}}, \gamma_{\text{м}}, \gamma_{\text{кпн}}$ — погрешности k, m и КПН соответственно.

На втором такте измерения на входы ЭТПМ по сигналу программно-временного устройства (ПВУ) автоматически подаются постоянные напряжения U_0 от источника опорного напряжения (ИОН) и $U_{\text{к}}$ от КПН, а выход ЭТПМ подключается к сумматору (Σ). Напряжение на выходе сумматора к концу второго такта измерения составляет:

$$U_{\Sigma} = k N_0 m [(\gamma_{\text{пв}} + \gamma_{\text{м}} + \gamma_{\text{п}} + \gamma_{\text{ион}} + \gamma_{\text{кпн}}) - \gamma_{\text{азу}}(\gamma_{\text{пв}} + \gamma_{\text{м}} + \gamma_{\text{к}} + \gamma_{\text{п}} + \gamma_{\text{кпн}})] \quad (14)$$

При условии, что погрешность АЗУ в режиме хранения информации ($\gamma_{\text{азу}}$) за время второго такта не превышает $0,1\%$ вторым членом в (14) можно пренебречь. Напряжение U_{Σ} , пропорциональное сумме погрешностей поверяемого ваттметра и поверочной установки,

измеряется с помощью двухзначного АЩ, показания которого при условии, что для любого предела измерения U_i , кратно I_0 , равны сумме приведенных погрешностей ваттметра и аппаратуры, выраженных в процентах. Предложенная структура установки позволила практически исключить из результата поверки наиболее существенные составляющие погрешности: γ_k , $\gamma_{\text{АЗУ}}$, $\gamma_{\text{АП}}$

В разработанной установке экспериментально реализован предложенный в работе метод поверки ваттметров с малыми пределами измерения по напряжению $I + 100$ мВ. При этом изменяется только структура входных цепей установки — масштабный преобразователь напряжения (m) переносится в цепь напряжения ПВ, а на вход ЭТПМ подается номинальное для него напряжение $IВ$. Применение этого метода обеспечило поверку милливаттметров, которые ранее с помощью термокомпараторов не поверялись.

При разработке рассмотренной аппаратуры предложен ряд схемных и конструктивных решений ее основных узлов: КРН, ИОН и АЗУ, погрешность которых, наряду с погрешностью перехода ЭТПМ- (γ_n), определяет суммарную погрешность установки. Калибратор постоянного напряжения, предназначенный для формирования ряда значений напряжения в диапазоне 0-1В с дискретностью 0,1 В, 1/15В, 1/25В и 1/30В, состоит из двухкаскадного параметрического стабилизатора, выполненного на термокомпенсированных стабилитронах типа Д818Е, и усилителя постоянного тока (УПТ), с дискретно изменяемой глубиной параллельной обратной связи по напряжению. Высокая стабильность формируемых напряжений достигается за счет выбора рабочей точки стабилитрона, в которой его ТКН близок к нулю, и использования в цепи обратной связи УПТ прецизионных микропроволочных

схемных элементов сопротивления. УПТ выполнен по ММ-системе с применением в каналах усиления переменного и постоянного тока интегральных микросхем IUT401Б. Экспериментальное исследование калибратора, проводившееся периодически в течение 1 года подтвердило следующие его параметры:

- погрешность установки любого значения напряжения не превышает 0,003%;

- изменение выходного напряжения в течение 8 часов работы менее 0,002%;

- изменение выходного напряжения КРН в течение года не превышает 0,005% и 0,003% в течение месяца после настройки;

- ТКН калибратора $3 \cdot 10^{-4} \%/^{\circ}\text{C}$.

- выходное сопротивление 0,01 Ом.

Компенсационный источник опорного напряжения является частным случаем КРН. В связи с отсутствием в ИОН делителей в цепи обратной связи УПТ, его нестабильность не превышает $10^{-4}\%$ за 8 часов, а ТКН $10^{-4} \%/^{\circ}\text{C}$.

Аналоговое запоминающее устройство совмещает функции трех узлов структурной схемы: собственно АЗУ, схемы сравнения и сумматора. Схема его состоит из запоминающего конденсатора, электронного коммутатора, обеспечивающего 2 режима работы: "сложение" и "хранение", и электронного УПТ с входным сопротивлением 10^8 Ом. Погрешность АЗУ в режиме "хранение" составляет 0,04%/сек., что при принятой структуре установки вносит в результат поверки пог-

решность менее 0,001%.

Результирующая погрешность аппаратуры, вызванная всеми составляющими, кроме погрешности перехода ЭТМ, определена путем комплексного исследования установки на постоянном токе. Проведение исследования показали, что при значениях входных сигналов, соответствующих пределу измерения, систематическая погрешность аппаратуры составляет 0,003%, а среднеквадратичное значение случайной погрешности менее 0,001%. Внутри диапазона измерения погрешность аппаратуры лежит в пределах $\pm 0,005\%$. С учетом полученной экспериментально погрешности ЭТМ суммарная погрешность полуавтоматической установки в звуковом диапазоне частот составляет 0,02% при $\cos \varphi = 1$ и 0,1% при $\cos \varphi = 0,1$, что позволяет использовать ее для поверки всех основных типов ваттметров, выпускаемых отечественной промышленностью. Установка может быть использована для поверки амперметров и вольтметров на переменном токе при замене ЭТМ измерительным преобразователем напряжения.

Разработанная полуавтоматическая аппаратура нашла практическое применение при поверке малокосинусных электродинамических ваттметров типа Д-55 кл. 0,5 и электронных малокосинусных ваттметров типа Ф530 кл. 2,5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В итоге проведенной работы получены следующие результаты:

1. Систематизирован и обобщен материал по методам и аппаратуре для точных измерений активной мощности и поверки ваттметров в звуковом диапазоне частот. Установлены требования, предъявляемые к измерительным преобразователям мощности (ИПМ) и аппаратуре в целом, в отношении необходимой универсальности, точности и производительности.

2. Теоретически исследована связь между погрешностью перехода ИПМ сравнения и неидеальностью характеристик элементов, из которых он состоит. Показано, что при равной неидеальности характеристик элементов ИПМ, в которых функциональный преобразователь физически совмещен с интегратором мгновенной мощности, обладают меньшей погрешностью перехода и часть ее, вызванная указанной неидеальностью, может быть устранена. Предложена классификационная схема ИПМ, основным классификационным признаком, в которой является наличие в ИПМ внутреннего или внешнего интегратора. Показано, что среди ИПМ с внутренним интегратором наибольшую точность компарирования обеспечивают термоэлектрические ИПМ (ТИПМ).

3. Теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что одной из основных причин возникновения погрешности компарирования, возрастающих при уменьшении $\cos \varphi$, является неоднозначность функции преобразования ИПМ, обусловленная в "мостовых" термоэлектрических ИПМ (ТИПМ) изменением тепловых режимов работы термопреобразователей (ТП) и асимметрией мостовой цепи ТИПМ. По-

лучены математические выражения погрешностей, вызванных неидеальностью характеристик ТП, как функции изменения температуры нагревателей в ходе компарирования, что привело к выводу о возможности их уменьшения путем стабилизации температуры нагревателей ТП.

4. Разработаны способы стабилизации тепловых режимов ТП, экспериментальное исследование которых показало возможность уменьшения погрешностей, вызванных неидентичностью и неквадратичностью ТП примерно на 2 порядка.

5. Предложен ряд методов построения ИПМ с электронными усилителями во входных и выходных цепях (ЭТПМ), которые позволяют решить две основные задачи: устранить погрешность, вызванную асимметрией мостовой цепи ТИПМ, и создать ИПМ со связанными цепями тока и напряжения, что необходимо для обеспечения поверки электронных ваттметров и измерения мощности в цепях с реальной нагрузкой. Показано, что использование электронных усилителей наиболее эффективно, если структура ЭТПМ реализует произведение входных величин путем вычитания квадрата их разности из суммы квадратов.

6. Предложен и теоретически исследован метод одновременного сравнения мощностей, представленных входными сигналами разных частот. Разработана схема ЭТПМ одновременного сравнения мощностей переменного и постоянного тока, реализующая этот метод и позволяющая создать быстродействующий ЭТПМ для цифровых ваттметров класса 0,05-0,1.

7. Теоретически и экспериментально исследованы погрешности ЭТПМ, вызванные неидеальностью параметров электронных усилителей, входящих в их структуру. Разработаны и изготовлены усилители для

входных цепей ЭТПМ, обладающие следующими параметрами: частотная погрешность при $f = 10^5$ Гц менее 0,01%, дрейф нуля менее 10 мкВ/час, входное сопротивление более $4 \cdot 10^6$ Ом, выходное сопротивление 0,02 Ом. Основными параметрами усилителя выходного сигнала, выполненного по ИДМ системе, являются: дрейф нуля 1 мкВ за 8 часов работы, удвоенная амплитуда шума менее 0,02 мкВ в полосе частот 1 Гц.

8. Разработана методика и аппаратура для экспериментального исследования погрешности ЭТПМ при малых $\cos \varphi$ и частотной погрешности ЭТПМ. Проведенные исследования показали, что частотная погрешность ЭТПМ не превышает 0,005% при $f = 20 \cdot 10^3$ Гц. Угловая погрешность ЭТПМ менее 0,1% при $\cos \varphi = 0,1$.

9. Предложен ряд методов построения высокопроизводительной полуавтоматической аппаратуры для поверки ваттметров любых систем в звуковом диапазоне частот. Выбрана структура полуавтоматической установки, оптимальная с точки зрения точности, производительности и простоты технической реализации. Показано, что использование полуавтоматической аппаратуры более чем в 20 раз повышает производительность труда при поверке ваттметров высоких классов точности.

10. Разработаны и экспериментально исследованы основные узлы полуавтоматической аппаратуры:

а) калибратор постоянного напряжения, воспроизводящий 30 значений напряжения с погрешностью 0,003% и временной нестабильностью 0,003%/месяц;

б) компенсационный источник опорного напряжения с нестабильностью, не превышающей $0,003\%/год$ и $10^{-4}\%/^{\circ}C$;

в) аналоговое запоминающее устройство с постоянной времени в режиме хранения информации $3 \cdot 10^3$ сек;

г) интегрирующий АИП с основной погрешностью $0,05\%$ и временем измерения $0,1$ сек.

II. На основе ЭТИМ разновременного сравнения и разработанных узлов создана полуавтоматическая аппаратура для поверки наиболее точных ваттметров с пределами измерения по напряжению $1 мВ-300 В$ и току $0,1 мА + 10 А$. Экспериментальное исследование аппаратуры показало, что ее погрешность не превосходит в звуковом диапазоне частот $0,02\%$ при $\cos \varphi = 1$ и $0,1\%$ при $\cos \varphi = 0,1$. Время, необходимое для определения погрешности поверяемого ваттметра после совмещения указателя прибора с поверяемой отметкой, составляет 5 сек. Аппаратура может быть использована для поверки вольтметров и амперметров при замене ЭТИМ на преобразователь напряжения и тока соответственно.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Шапиро Е.З. О возможности расширения пределов измерения поверочных установок с термоэлектрическими компараторами в сторону малых значений. Сборник. Вопросы улучшения параметров транзисторных приборов. Л., 1970 г.

2. Шапиро Е.З. Разработка методов и создание аппаратуры для полуавтоматической поверки амперметров, вольтметров и ваттметров на переменном токе. Метрология и измерительная техника.

вып.2, 1972 г. ВНИИКИ.

3. Безикович А.Я., Шапиро Е.З. Об уточнении методики поверки малокосинусных ваттметров. Сборник. Вопросы улучшения параметров транзисторных приборов. Л., 1970 г.

4. Безикович А.Я., Шапиро Е.З. Некоторые вопросы теории компарирования активной мощности. Измерительная техника № 6, 1972 г. (в печати).

5. Безикович А.Я., Шапиро Е.З. Погрешности компарирования мощности, вызванные асимметрией измерительного преобразователя, и методы их устранения. Метрология № 3 1972 г., приложение к журналу Измерительная техника.

6. Таубе Б.С., Шапиро Е.З. Интегрирующие аналого-цифровые преобразователи в автоматической аппаратуре для точного измерения постоянного и переменного тока. Труды метрологических институтов вып.117(177). М.-Л., 1970 г.

7. Таубе Б.С., Шапиро Е.З., Эскин С.П., Прицке В.И. Высокостабильный компенсационный источник опорного напряжения. Измерительная техника № 6, 1969 г.

8. Волков Ю.П., Ткаченко А.Н., Шапиро Е.З. Измерительный усилитель постоянного тока с повышенной стабильностью нулевого уровня. Приборы и системы управления № 2, 1972 г.

9. Таубе Б.С., Шапиро Е.З. О построении образцовых автоматических измерителей переменного тока для поверки электроизмерительных приборов. Сборник. Устройства и элементы

систем автоматизации научных экспериментов. Новосибирск, 1970 г.

10. Ш а п и р о Е.З. Компаратор мощности переменного тока. Авторское свидетельство по заявке № 1604193/18-10. Решение ВНИИГПЗ от 29.10.71 г.

11. Ш а п и р о Е.З. Измерительный конденсатор переменной емкости. Авторское свидетельство № 213193 1967 г.

12. Б е з и к о в и ч А.Я., Ш а п и р о Е.З. Компаратор активной мощности переменного тока. Авторское свидетельство по заявке № 1439816/18-10. Решение ВНИИГПЗ от 23.12.1971 г.

13. Т а у б е Б.С., Ш а п и р о Е.З. Устройство для измерения напряжения переменного тока. Авторское свидетельство № 209581 1968 г.

14. П р и ц к е р В.И., Т а у б е Б.С., Ш а п и р о Е.З., Э с к и н С.П. Устройство для автоматического считывания показаний со шкал поверяемых приборов. Авторское свидетельство № 266057 1970 г.

Основные положения диссертации доложены на следующих конференциях:

1. IV Всесоюзной Конференции молодых метрологов. Ленинград, 1968 г.

2. IX Всесоюзной Конференции по автоматическому контролю и методам точных измерений. Новосибирск, 1968 г.

3. П Всесоюзной Конференции по комбинированным приборам. Житомир, 1970 г.

4. П Всесоюзной Конференции по метрологии и методам точных измерений. Тбилиси, 1971 г.

5. П Республиканской Конференции по электронным приборам, основанным на коммутационно модуляционных методах измерений. Львов, 1971 г.

