

В. И. Боднарук

**СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ
РАЗВИТИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**



Д. Д. Тащук

В.И. Боднарук¹, Д. Д. Тащук²

(¹Черновицкий национальный университет
им. Ю.Федьковича;

²Институт термoeлектричества, Черновцы, Украина)

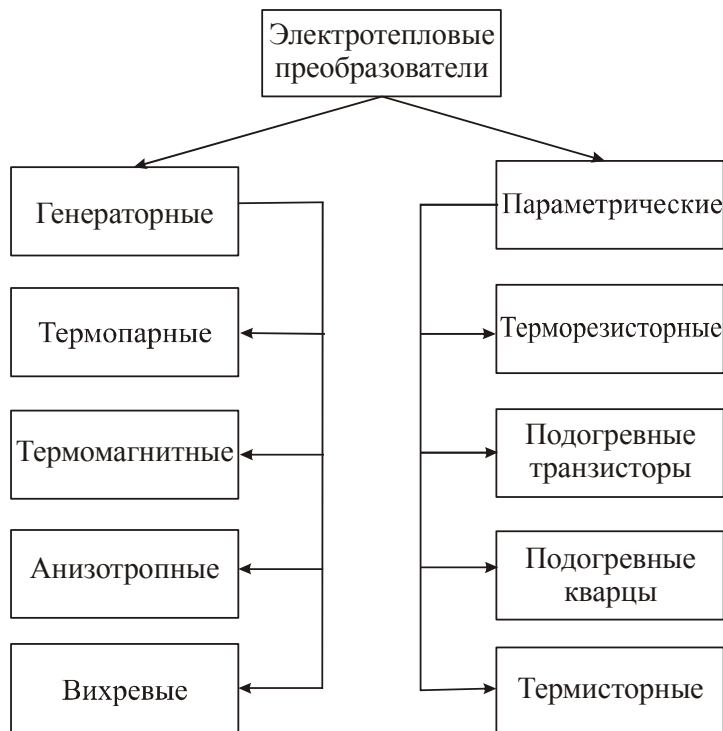
- На основе сравнительного анализа измерительных термопреобразователей, изготовленных по разным технологиям, дана краткая характеристика их преимуществ и недостатков, обоснованы перспективные направления теоретических и экспериментальных исследований, направленных на создание новых приборов в соответствии с требованиями настоящего времени.

Введение

Единственной истинной мерой мощности электрического сигнала является его действующее (эффективное) значение. Только оно точно отображает мощность сигнала и, соответственно, открывает возможность прямого и строгого сравнения (компарирования) теплового действия сигналов постоянного и переменного токов независимо от их формы электротепловым методом [1].

Таблица 1

Классификация электротепловых преобразователей переменного тока



Прообразом электротеплового прибора послужил термокrest для исследования теплового действия тока, созданный Пельтье в 1834 году. В 1884 году Н. А. Гезехус предложил использовать подобный термокrest как прибор для измерения силы тока в электрической цепи.

Устройство Гезехуса состояло из двух термобатарей, спаи которых были вмонтированы в резервуары воздушного дифференциального термометра. При пропускании электрического тока через термобатарею термометр регистрировал изменение температуры, пропорциональное силе тока [3].

Приведенная в таблице 1 классификация охватывает известные приборы, в которых для преобразования могут использоваться различные физические явления, например, температурная зависимость сопротивления терморезистора, изменение частоты в результате подогрева кварца и тому подобное. Общим для всех видов преобразователей является превращение измеряемого сигнала в тепловую энергию, которая выделяется в нагревателе. Самые широко распространенные разогревные бесконтактные преобразователи генераторного типа на основе термопар рассмотрим детальнее.

Актуальность исследований обусловлена тем, что в настоящее время резко возросли требования к точности измерения электрических величин переменного тока в расширенном диапазоне частот, метрологические центры многих стран ведут интенсивные поиски новых технических решений и разрабатывают высокоточные измерительные приборы и средства их метрологического обеспечения.

Цель обзора – на основе сравнительного анализа измерительных термопреобразователей, изготовленных по разным технологиям, изложить краткую характеристику их преимуществ и недостатков, обосновать перспективные направления теоретических и экспериментальных исследований, направленных на создание новых современных приборов в соответствии с требованиями настоящего времени.

Классификация и сравнительный анализ измерительных термопреобразователей

Основным элементом термоэлектрического метода компарирования является измерительный термопреобразователь, в котором энергия измеряемого тока превращается в тепловую, выделяющуюся в резистивном нагревателе, и последующее превращение тепловой энергии в электрическую с помощью термоэлемента (термопары). Нагреватель является входной цепью термопреобразователя (ТП), термопара – выходной. Связь между током, который подводится к нагревателю, и термоЭДС, развиваемой термоэлементом E_T , приближенно описывается выражением

$$E_T = KI_N^2, \quad (1)$$

где K – коэффициент, который зависит от материала нагревателя и термоэлемента, конструкции ТП и условий его работы.

Из выражения (1) следует основное свойство измерительных термопреобразователей (ИТП) – независимость ЭДС на его выходе от направления тока во входной цепи, что дает возможность применять ИТП для измерения действующих значений переменного тока, мощности и других величин [2].

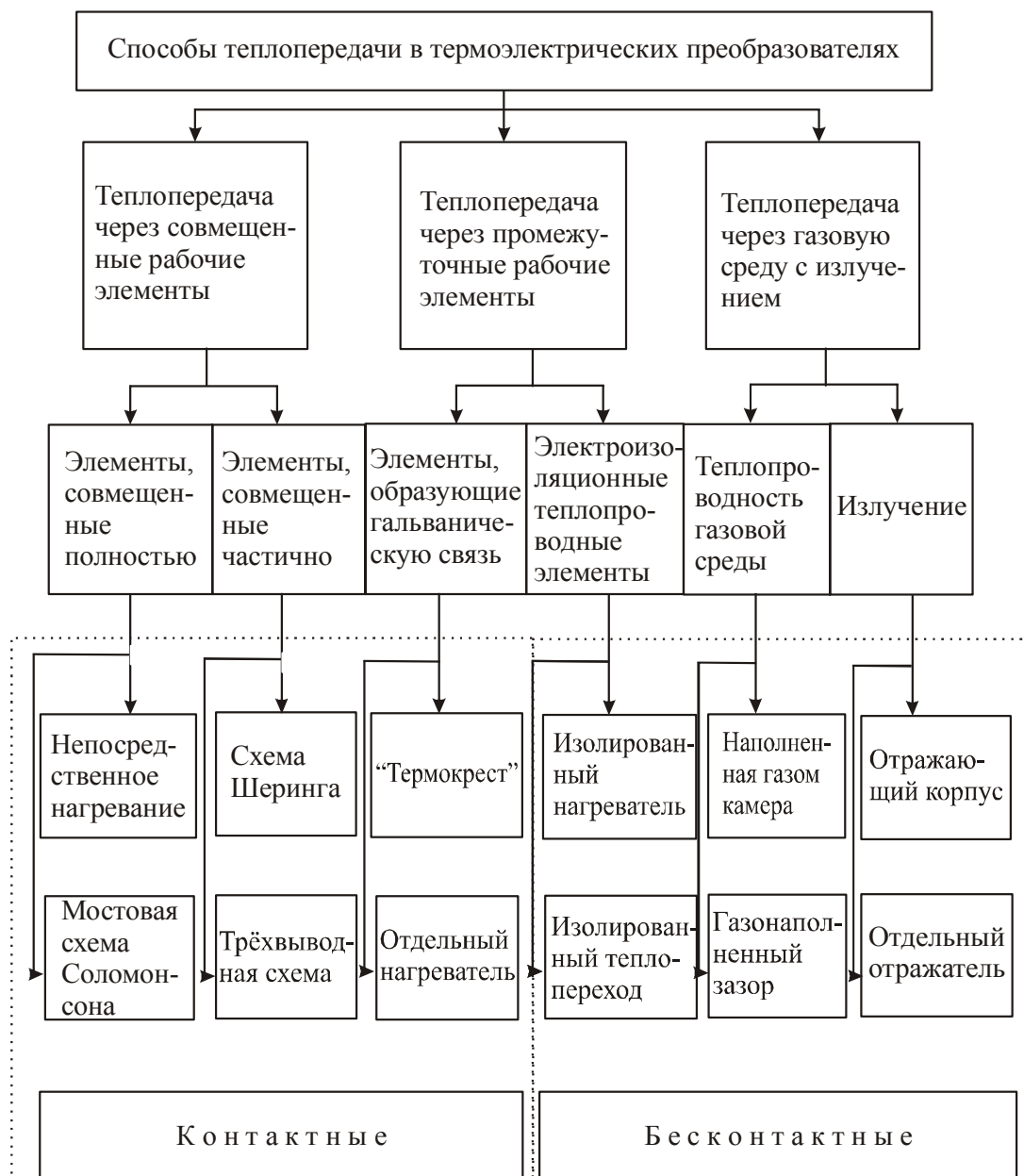
Когда известны соотношения между переменными величинами токов, которые подводятся к термопреобразователю, и термоЭДС термопары, можно измерять переменные токи аппаратурой постоянного тока. Высокая точность термоэлектрического метода основана на результатах всестороннего изучения физических эффектов и тепловых процессов, которые имеют место в термопреобразователях, и их влияния на точность преобразования. Таким образом, точность измерения величин переменного тока в основном зависит от качества термоэлектрических преобразователей.

Термопарные измерительные преобразователи в процессе своего развития постоянно совершенствовались, изменялись схемы их построения для повышения точности и надежности

измерений. В таблице 2 приведена классификация термопреобразователей, в которых различными способами осуществляется взаимосвязь между входной и выходной цепями.

Таблица 2

Классификация по способу теплопередачи между входной и выходной цепями



Обобщенная модель термопарного измерительного преобразователя и его эквивалентная электрическая схема приведены на рис. 1 а, б.

В таком преобразователе осуществляется самое простое преобразование мощности сигнала измеряемой величины P в мощность выходного сигнала преобразователя

$$P = K_0 P_{\text{вых}}, \quad (2)$$

где K_0 – коэффициент, характеризующий эффективность преобразования [5].

Рассмотрим модели термопреобразователей непосредственного нагрева (рис. 2).

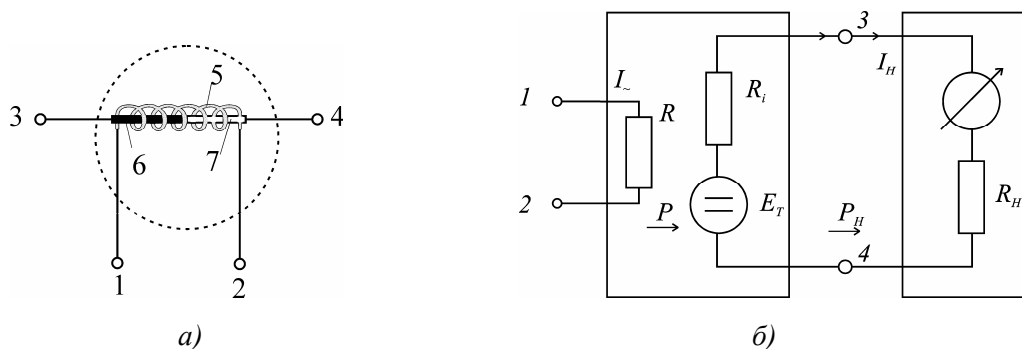


Рис. 1. Модель генераторного термоэлектрического преобразователя (а) и его эквивалентная схема с подсоединенным измерительным прибором (б).
1, 2 – входная цепь; 3, 4 – выходная цепь; 5 – нагреватель; 6, 7 – ветви термопары.

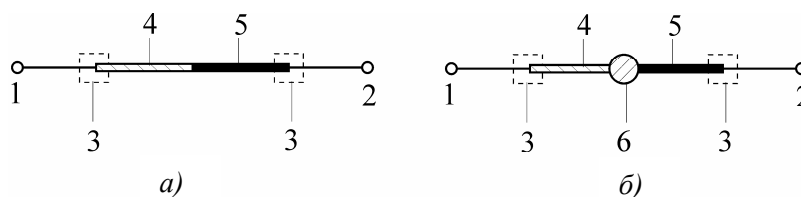


Рис. 2. Модели термоэлектропреобразователей непосредственного нагрева а) с дополнительным нагревателем б). 1, 2 – электрические выводы; 3 – термостат; 4, 5 – ветви термопары; 6 – дополнительный нагреватель.

Преобразователь непосредственного нагрева, модель которого изображена на рис. 2а, не имеет раздельных входной и выходной цепи. Термопара, состоящая из ветвей 4 и 5, служит одновременно входной и выходной цепью. Измеряемый переменный ток в таком ТП протекает через термопару, разогревая ее ветви и спай. Постоянная составляющая ЭДС, которая генерируется термопарой, отводится от ее холодных (T_0) концов к измерительному прибору постоянного тока.

Преимуществом таких ТП является предельная простота конструкции и минимальное число рабочих элементов. Существует реальная возможность сведения к минимуму тепловых потерь и, следовательно, достижения высокой чувствительности и максимального быстродействия.

Недостаток – отсутствие возможности градуирования их на постоянном токе в результате искажающего действия эффектов Пельтье и Томсона, невысокая точность преобразования, ограниченность частотного диапазона.

Модель для объяснения принципа работы ТП непосредственного нагрева с помощью мостовой схемы приведена на рис. 3.

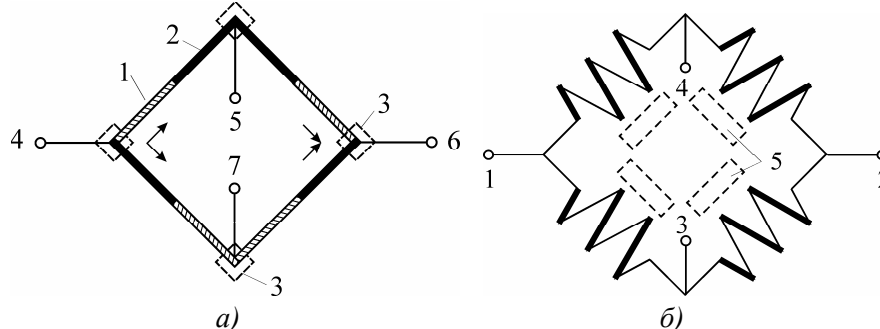


Рис. 3. Модели термопреобразователей с использованием мостовой схемы:
а) одноэлементный, где 1, 2 – ветви термопары; 3 – термостаты (T_0); 4, 6 – контакты для подведения измеряемого тока; 5, 7 – выводы термоЭДС;
б) многоэлементный, где 1, 2 – вход; 3, 4 – выход, 5 – термостаты.

Как видно из рис. 3а, мостовая схема ТП состоит из соединенных соответствующим образом четырех термопар, через которые протекает измеряемый ток. Каждая из термопар представляет собой, в сущности, ранее рассмотренный термопреобразователь непосредственного нагрева. Выходная термоЭДС четырех последовательно-параллельно соединенных термопар выводится к измерительному прибору постоянного тока.

На рис. 3б приведена модель многоэлементного преобразователя, выполненного с использованием мостовой схемы.

Преобразователи непосредственного нагрева по принципу мостовой схемы могут быть изготовлены на любое число термопар, кратное четырем, тогда в каждое плечо моста включается n термопар, что позволяет увеличить коэффициент добротности A [4].

Увеличение коэффициента добротности важно при изготовлении точных и надежных переносных термоприборов.

Преимущества ТП непосредственного нагрева с помощью мостовой схемы – это высокая чувствительность и быстродействие.

Недостатки – значительный общий участок цепи переменного и постоянного тока, ограничивающий частотный диапазон применения, отсутствие возможности градуирования на постоянном токе, сложность изготовления и, как следствие, – невысокая точность преобразования.

На рис. 4 изображена модель термопреобразователя с частично совмещенными элементами.

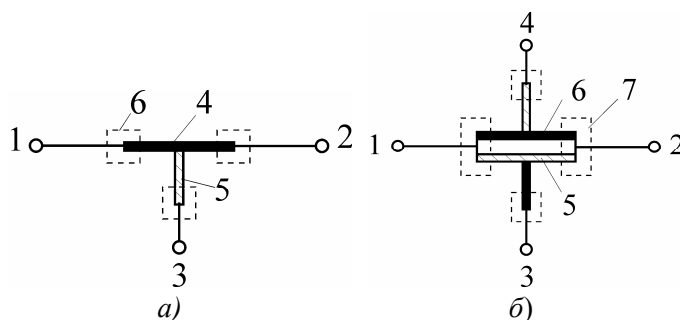


Рис. 4. Модель ТП непосредственного нагрева с частично совмещенными элементами (а).

1, 2 – входная цепь; 2, 3 – выходная цепь; 4, 5 – ветви термопары; 6 – термостат.

Термопреобразователь с частично совмещенными элементами по мостовой схеме Шеринга (б).

1, 2 – вход; 3, 4 – выход; 5, 6 – ветви термопар – нагреватели; 7 – термостаты.

В ТП, модель которого приведена на рис. 4, измеряемый переменный ток протекает по одной из ветвей термопары 1, однако он не переходит, как это имеет место в рассмотренных выше ТП, из одного материала в другой. Существует возможность частично решить проблему независимой оптимизации параметров входной и выходной цепей ТП, что является невозможным в преобразователях непосредственного нагрева, в которых нагреватель и термопары совмещены полностью.

ТП, построенные по трехвыводной схеме, используются в трансформаторных преобразователях, где нагреватель питается от отдельной вторичной обмотки измерительного трансформатора и градуируется на переменном токе пониженной частоты [9, 16].

Если сделать зеркальное отображение элементов ТП (рис. 4а) и поменять местами материал ветвей термопар, получим ТП по принципу мостовой схемы Шеринга. Такой ТП состоит из двух последовательно соединенных термопар с непосредственным нагревом. Одна из ветвей каждой термопары содержит две параллельно соединенные ветви (разветвляется). Если четырехугольник, образованный разветвлением обеих термопар, будет симметричным по полному сопротивлению, то термоток не попадает в измерительную цепь, а измеряемый ток – в измеритель термоЭДС.

Недостатками таких ТП являются относительно большой общий участок цепи переменного и постоянного тока, ограниченный частотный диапазон и сложность изготовления хорошо уравновешенных мостовых схем, ограниченный выбор материалов. Материалы ветвей термопар, разогреваемых током, необходимо выбирать с близкими теплотехническими и температурными коэффициентами.

Последующее расширение рабочего частотного диапазона и повышение точности превращения сигналов переменного тока достигнуто в ТП, в которых общий участок совмещенных элементов сведен к точечному контакту. Самым простым ТП этого типа является «термокрест» (рис. 5), образованный соединением двух термоэлектродов по геометрической середине. Цепь, образованная отрезками проводников от места соединения до контактов 1, 2, является входной, а отрезки от места соединения до контактов 3, 4 – выходной. Как и в ТП непосредственного нагрева, нагреватель состоит из отрезков двух материалов, и рабочий ток переходит из одного материала в другой, что не позволяет такой ТП применять на постоянном токе. Еще одним изъяном ТП типа «термокрест» является невозможность отдельной оптимизации параметров входной и выходной цепей. Так, при создании ТП на большие токи, формируя нагреватели, необходимо использовать половину проволоки, образующей термопару, большого сечения, что приводит к росту тепловой инерции и увеличивает отведение тепла от горячего спая, – снижает чувствительность [12]. В силу указанных причин ТП «термокрест» имеют ограниченное применение.

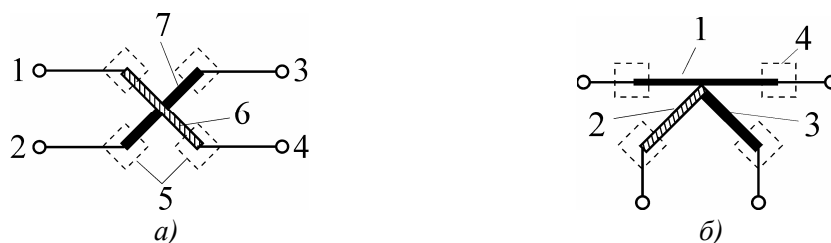


Рис. 5. Модель ТП типа «термокрест» (а) и контактного ТП с отдельным нагревателем (б).
На рис. 5а: 1, 2 – цепь нагревателя; 3, 4 – цепь термопары; 5 – термостат; 6, 7 – ветви термопары.
На рис. 5б: 1 – нагреватель; 2, 3 – ветви термопары; 4 – термостат.

Сравнительно высокие параметры и характеристики имеют контактные ТП с нагревателем в виде линейного отрезка проводника из резистивного материала. По геометрической середине нагреватель соединен (например, сваркой) со спаем термопар (рис. 5б).

В этом преобразователе свойства нагревателя могут быть оптимизированы в соответствии с температурными и частотными требованиями независимо от свойств материалов ветвей термопары. В конструкциях контактных ТП достигнуто значительное повышение точности преобразования и расширение частотного диапазона.

Недостатком таких термопреобразователей является наличие гальванического контакта между входной и выходной цепями, что приводит к увеличению погрешностей на высоких частотах. ТП, в которых электрический контакт между нагревателем и термопарой отсутствует, а тепловой контакт осуществляется через электроизолятор из материала с хорошей теплопроводностью, называют бесконтактными [14].

В бесконтактном термопреобразователе с теплопереходом в виде изоляционной «капли» достигнуто существенное улучшение метрологических и эксплуатационных характеристик. Это обусловлено в первую очередь тем, что входная и выходная цепи термопреобразователя гальванически развязаны. Величина сопротивления изоляционного теплоперехода составляет более 100 МОм, что существенно уменьшает возможность проникновения переменного тока в цепь термопары и, соответственно, измерительного прибора.

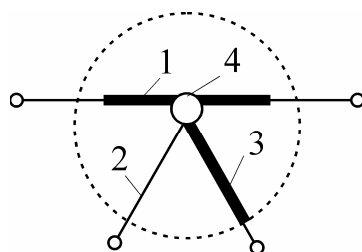


Рис. 6. Модель бесконтактного ТП с одной термопарой: 1 – нагреватель; 2,3 – ветви термопары; 4 – изоляционная «капля».

Кроме того, материалы нагревателя и термопары могут быть независимо оптимизированы в соответствии с тепловыми и электрическими требованиями для обеспечения оптимальных условий преобразования. Вследствие этого в бесконтактных преобразователях достигнуты значительно меньшие погрешности преобразования в диапазоне частот переменного тока.

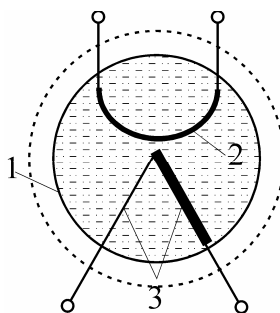


Рис. 7. Модель преобразователя с теплопереходом в виде капсулы, заполненной газом. 1 – капсула, 2 – нагреватель, 3 – термопара.

Понижение погрешности асимметрии без значительного ухудшения частотной характеристики ТП достигается в приборах (рис. 7) с увеличенной областью теплового контакта нагревателя с термопарой, образованной теплопереходом в виде капсулы, заполненной газом с высокой теплопроводностью, например, водородом.

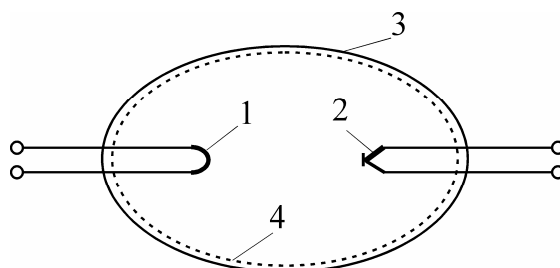


Рис. 8. Модель преобразователя с корпусом эллипсоидальной формы. 1 – нагреватель; 2 – термопара; 3 – корпус; 4 – отражающее покрытие.

Последующее улучшение частотных характеристик, а также увеличение значения пробойного напряжения достигается в ТП с теплопередачей излучением. Устройство такого ТП приведено на рис. 8. Преобразователь вмонтирован в корпус формы эллипсоида вращения, внутренняя поверхность которого покрыта отражающей пленкой. Вблизи одного из фокусов эллипсоида расположен нагреватель, а вблизи другого – термопара с принимающей площадкой. Для снижения конвективных потерь корпус вакуумируется. В таких приборах нагреватель и термопара могут быть расположены на относительно больших расстояниях, что позволяет

существенно снизить величину переходной емкости и влияние токов высокой частоты на выходную цепь термопары.

Опыт разработки и эксплуатации бесконтактных преобразователей способствовал созданию приборов с расширенными функциональными возможностями и повышенной точностью преобразования переменного тока. Такие измерительные преобразователи подобно известной классификации средств измерений [4], можно условно разделить на преобразователи измеряемых величин и преобразователи измеряемых и вспомогательных величин.

Классификация термопреобразователей по количеству преобразуемых величин приведена в табл. 3.

На рис. 9 приведена модель преобразователя-сумматора. Преобразователь-сумматор состоит из двух электрически изолированных нагревателей, имеющих тепловой контакт с термопарой или батареей термопар.

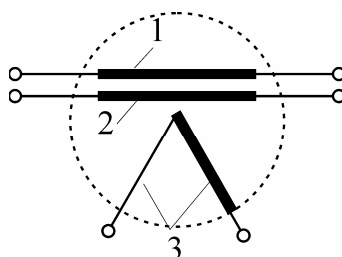


Рис. 9. Модель преобразователя-сумматора.
 1, 2 – нагреватели; 3 – термопара.

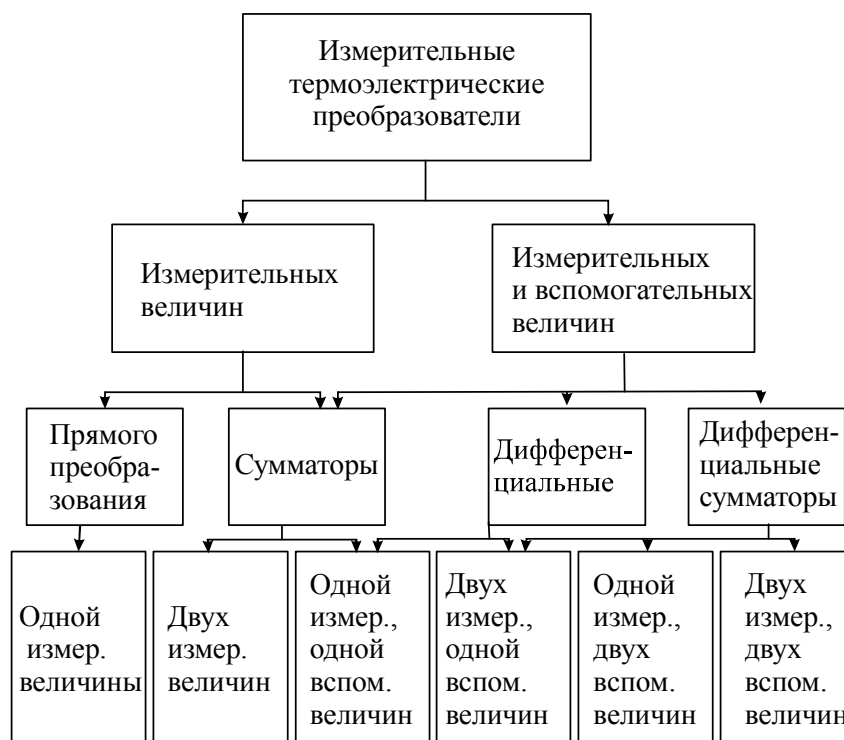
В таком преобразователе осуществляется превращение вида:

$$E_T = k(I_{H1}^2 + I_{H2}^2), \quad (3)$$

где I_{H1} и I_{H2} токи в нагревателях 1 и 2 соответственно.

Таблица 3

Классификация термопреобразователей по количеству преобразуемых входных величин



Токи I_{H1} и I_{H2} могут быть вызваны подачей на входы преобразователя двух независимых измеряемых сигналов или одного измеряемого и одного вспомогательного сигналов. В первом случае выходная термоЭДС E_T является функцией суммы двух измеряемых величин, во втором – можно реализовать оригинальный метод преобразования, который получил название метода равных температур [6]. В этом случае при изменении измеряемой величины вспомогательную изменяют таким образом, чтобы суммарная мощность обеих превращаемых величин оставалась постоянной и рабочая температура спая термопары не изменялась. Температуру, которую поддерживают постоянной, выбирают оптимальной для данного термопреобразователя, то есть, когда обеспечивается одновременно максимальное значение E_T , удовлетворительная точность преобразования и стабильность. В случае использования метода равных температур уменьшается влияние на точность превращения температурных зависимостей параметров материалов нагревателя и термопары и нелинейность тепловых потерь [7].

Низкие эксплуатационные и метрологические параметры преобразователей с металлическими термопарами (например, типа ТВБ 1–9) осложняют их использование при разработке современных электроизмерительных приборов, которые требуют применения различных структурных методов повышения точности [8, 9].

В дифференциальном преобразователе два идентичных нагревателя находятся в тепловом контакте со спаями дифференциальной термопары.

В таком преобразователе осуществляется превращение вида:

$$E_T = k(I_{H1}^2 - I_{H2}^2) . \quad (4)$$

Токи нагревателей I_{H1} и I_{H2} могут быть вызваны как сигналами двух измеряемых величин переменного тока, так и одной переменного тока и одной вспомогательной постоянного тока.

На рис.10 приведены модели дифференциальных преобразователей.

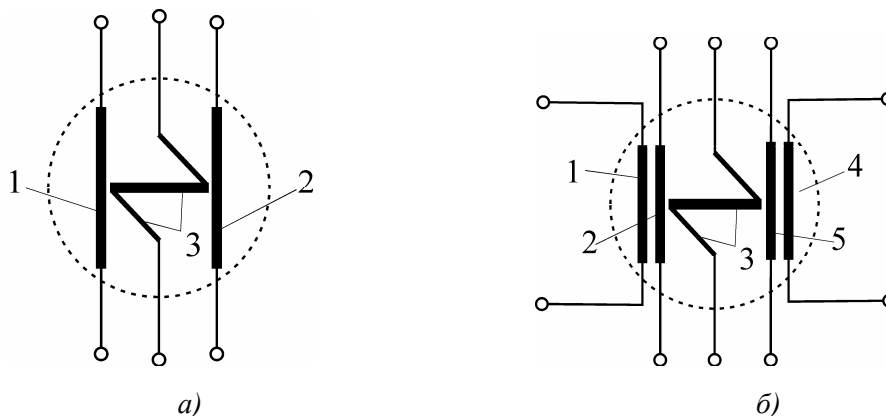


Рис. 10. Модель дифференциального преобразователя (а) и дифференциального сумматора (б).
1, 2, 4, 5 – нагреватели; 3 – дифференциальная термопара.

В краткой классификации, приведенной выше, представлены основные типы моделей термоэлектрических преобразователей, на которых создаются и совершенствуются современные преобразователи переменного тока по новым технологическим принципам. На сегодня в их развитии выделились три основных направления:

- криогенные преобразователи на основе эффекта Джозефсона [10, 11];
- преобразователи на основе полупроводниковых оптимизированных материалов [12–15];
- тонкопленочные преобразователи [16, 17].

Криогенные преобразователи на основе эффекта Джозефсона имеют высокую чувствительность и их используют, в первую очередь, для исследования предельно малых значений переменного тока. Однако высокая стоимость и сложность таких систем ограничивают их широкое применение.

Пленочные преобразователи на основе микроэлектронной технологии отличаются сравнительно высокой воспроизводимостью параметров, идентичностью и точностью превращения постоянного тока. К их недостаткам следует отнести ограниченный частотный диапазон преобразования и большое сопротивление пленочной термобатарей, что влечет высокий уровень шумов [18].

Разработка полупроводниковых термоэлектрических материалов, оптимизированных согласно требований измерительной техники и метрологии, создала предпосылки для принципиально новых решений в проектировании и изготовлении термоэлектрических преобразователей:

- достижение чувствительности 100 В/Вт создало условия расширения диапазона измеряемых переменных токов в сторону малых номинальных значений до 0.1 мА;

- уменьшение рабочей температуры нагревателя в 10–15 раз (по сравнению с преобразователями на основе металлических термопар) повысило способность к перегрузке и обусловило уменьшение влияния эффекта Томсона на точность преобразования постоянного тока;

- высокая чувствительность полупроводниковых термопар дала возможность отказаться от вакуумирования рабочего объема преобразователей с чувствительностью до 10 В/Вт и значительно разнообразить выбор конструкционных материалов, например, для расширения рабочего диапазона частот до 500 МГц;

- отказ от вакуумирования и заполнения рабочего объема преобразователей с одной термопарой смесью газов дали возможность реализовать отклонение от квадратичности превращения 0.01–0.005%;

- использование полупроводниковых термопар позволяет повысить быстродействие преобразователей в 10 и более раз.

Выводы

Наряду с поиском и использованием новых физических явлений для создания высокочувствительных первичных измерительных преобразователей (например, на эффекте Джозефсона) и современных технологий их изготовления актуальным и перспективным остается детальное изучение:

- тепловых условий и температурных режимов работы полупроводниковых термопреобразователей;

- влияния конфигурации и свойств материалов тепловыделяющих элементов и формы термоэлементов на тепловые процессы;

- особенностей теплообмена в газонаполненных конструкциях приборов.

Это открывает дополнительные возможности для разработки новых конструкций полупроводниковых термопреобразователей:

- дифференциальных с высокой идентичностью характеристик, повышенным выходным сигналом, уменьшенной частотной погрешностью и повышенной надежностью;

- малогабаритных – повышенного быстродействия с расширенным частотным диапазоном;

- экранированных, с большими функциональными возможностями – для работы в электромагнитных полях;

- высокочувствительных преобразователей на малые значения номинальных токов.

Литература

1. Van Erk T.H., Rauch S. How to measure ac signals accurately// Test and Measuring Instruments. – 1976. – P.94-96.
2. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник / – К.: Наук. думка, 1979. – 768 с.
3. Буряк А.А., Карпова Н.Б. Очерки развития термоэлектричества / Отв.ред. Анатычук Л.И. – К.: Наук. думка, 1988. – 280 с.
4. Туричин А.М., Новицкий П.В. и др. Электрические измерения неэлектрических величин / – К.: Энергия, 1975. – 576 с.
5. Электрические измерения физических величин: (Измерительные преобразователи). – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
6. Попов В.С. Измерение среднеквадратического значения переменного тока способом равных температур // Измерительная техника. – №7. – 1999. – С.53-59.
7. Попов В.С. Компараторы тока, напряжения и активной мощности на электротепловых преобразователях // Измерительная техника. – №9. – 1999. – С.56-60.
8. Туз Ю.М. Структурные методы повышения точности измерительных устройств. – К.: Выща школа, 1986. – 160с.
9. Туз Ю.М. Исследование динамических свойств линейного преобразователя эффективных значений переменного тока // Вестник КПИ. Сер. автоматика и электроприборостроение. – К. – 1972. – №9. – С.168-170.
10. Burrougs C.J., Bens S.P., Hamilton C.A., Harvey T.E., Kinard J.R., Lipe T.E., Sasaki H. Thermoelectric Transfer Difference of Thermal Converters Measured with a Josephson Source //IEEE Transactions on instrumentation and measurement.–V.48.– NO.2, april 1999.
11. Lipe T.E., Reintsema C.D. and Kinard J.R..An improved Sensor for the NIST Criogenic Thermal Transfer Standart // CPEM 2002 Conferense DiGest. –Ottava, Ontario,Canada, June 16-21, 2003. – P.108-109.
12. Анатычук Л.И., Андрусак С.А., Боднарук В.И., Гореликов Н.И., Лусте О.Я., Цыганюк Ю.С. Применение полупроводниковых анизотропных кристаллов для электрических измерений // Измерительная техника. – №2. – 1972. – С.52-56.
13. Анатычук Л.И., Боднарук В.И., Димитрашук В.Т., Лусте О.Я. О возможности управления температурной зависимостью параметров термоэлектрических преобразователей // ИФЖ. – 1976. – №2, 31.– С. 301-305.
14. Боднарук В.И. Малогабаритные полупроводниковые преобразователи // Термоэлектричество. –2002. – № 3. – С.46-49.
15. Боднарук В.И. Полупроводниковые термоэлектрические преобразователи переменного тока и приборы на их основе // Термоэлектричество. – 2005. – №1. – С.78-83.
16. Kinard J.R., Lipe T.E. and Wunsch T.F. Improved High-Current Thin-Film Multijunction Thermal Converters // CPEM 2002 Conferense DiGest. – Ottava, Ontario,Canada, June 16-21, 2003. – P.364-365.
17. Kinard J.R., Huang D.X., Novotny D.B. Performance of Multilayer Thin-Film Multijunction Thermal Converters // IEEE Transactions on instrumentation and measurement. – V.44. – No.2, April 1995.
18. Новицкий П.В. Основы информационной теории измерительных устройств. – Л.: Энергия, 1968. – 248 с.

Поступила в редакцию 10.02.09.