

## ГОМЕОСТАТИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

Рассмотрены вопросы повышения информационной эффективности измерительных преобразователей с использованием гомеостатических структур. Исследованы различные типы структур измерительных преобразователей, выявлены характерные особенности, определены типы отношений между структурами. Определена роль гомеостаза и гомеокинеза в повышении информационной эффективности. Представлены примеры реализации возможных типов гомеостатических структур в измерительных преобразователях. Сформулированы основные принципы построения гомеостатических структур.

Интегральным показателем качества измерительных приборов и систем является информационная эффективность [1, 2]. Повышению информационной эффективности измерительных преобразователей посвящено большое количество работ, к примеру [3–9]. Создание новых, более совершенных измерительных преобразователей требует обобщения накопленных знаний, опыта, при этом эффективным инструментом совершенствования служит системная методология [10]. У специалистов по системному анализу применим подход, когда система делится на подсистемы и изучается только ее обобщенная структура. Данный подход к решению различных проблем показал свою конструктивность [11, 12]. Он позволяет сужать задачу, уменьшать объем рассматриваемой информации и добиваться структуризации любой, даже очень сложной проблемы.

Рассматривая измерительный преобразователь как целостный объект, являющийся частью некоторой системы и имеющий некие цели своего функционирования, можно выделить главные цели – обеспечение работоспособности и обеспечение устойчивости преобразования информации. Таким же целям должна соответствовать и система в целом.

Независимо от типа систем они имеют определенную общность в своей организации и в механизмах управления, причем важнейшую роль при формировании систем играют гомеостатические принципы [13]. Как известно, гомеостатика изучает принципы организации и механизмы управления, обеспечивающие поддержание гомеостазов (устойчивых равновесий) в динамике. Практически все сложные системы являются гомеостатическими («гомео» – от греческого подобный, одинаковый, сходный) – они распадаются, если не удастся поддержать заданное постоянство жизненно важных параметров, функций, циклов или трендов развития.

В соответствии с принципом системного минимума всякая система стремится измениться таким образом, чтобы свести к минимуму эффект внешнего воздействия. Причем, если интегральные показатели системы остаются постоянными при

отсутствии изменений внешней среды, то такое состояние называют *состоянием гомеостаза*. В том случае, когда интегральные показатели системы колеблются относительно некоторого среднего значения в определенных допустимых пределах, то такое состояние именуют *состоянием гомеокинеза*. Создание состояний гомеостаза и гомеокинеза в различных системах, в том числе в измерительных преобразователях, позволяет обеспечить работоспособность и устойчивость. Вместе с тем гомеостатические состояния, создаваемые в измерительных преобразователях, могут служить основой повышения их информационной эффективности.

Рассмотрим обобщенную структуру измерительного преобразователя (рис. 1). Структура включает следующие объекты: входные воздействия (факторы, сигналы), представленные векторами  $L_{\text{н}}$  и  $L_{\text{д}}$ , дестабилизирующие воздействия (факторы), представленные вектором  $L_{\text{д}}$ , выходные сигналы, описываемые векторами  $U$  и  $Q$ , и измерительный преобразователь, который характеризуется совокупностью функций преобразования  $F_{L_{\text{н}}U}[x; u; z; t]$  и  $F_{L_{\text{н}}Q}[x; y; z; t]$ . При этом координаты многомерного вектора  $L_{\text{н}} = [x_1; x_2; \dots; x_n; t]$  определяют информативные параметры входного воздействия; координаты многомерного вектора  $L_{\text{д}} = [y_1; y_2; \dots; y_m; t]$  – неинформативные параметры входного воздействия.

Измерительный преобразователь в реальных условиях подвержен влиянию совокупности дестабилизирующих воздействий (факторов), как вне-

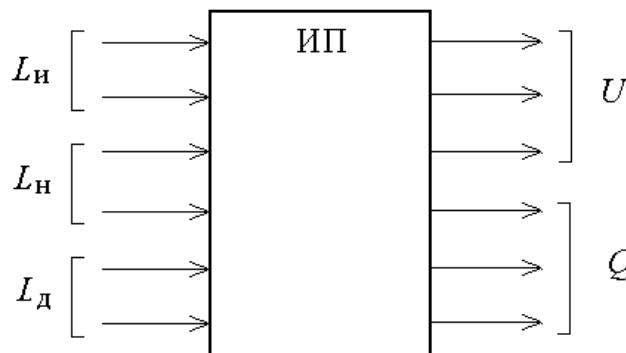


Рисунок 1. Обобщенная структура измерительного преобразователя.

шних, так и внутренних, представленных многомерным вектором  $L_d = [z_1; z_2; \dots; z_k; t]$ . На выходе измерительного преобразователя информативные и неинформативные параметры описываются координатами многомерных векторов  $U = [u_1; u_2; \dots; u_p; t]$  и  $Q = [q_1; q_2; \dots; q_p; t]$ . Измерительный преобразователь обладает определенными функциями преобразования между параметрами входного воздействия, дестабилизирующими факторами и параметрами выходного сигнала, а кроме того, характеризуется определенными параметрами и связями отдельных преобразователей, из которых состоит измерительный преобразователь. Между информативными параметрами входного воздействия (сигнала) и выходного сигнала существует связь, определяемая номинальной функцией преобразования или функцией информативного преобразования. Эта функция преобразования является основной, ради которой разрабатывается преобразователь.

Сохранение работоспособности и устойчивости измерительных преобразователей означает сохранение их основных качественных характеристик. Данная задача обычно решается с помощью отрицательных обратных связей, способствующих уменьшению влияния реакций системы на внешнее воздействие. С помощью отрицательных обратных связей стабилизируются режимы работы. Положительные обратные связи наоборот усиливают внешнее воздействие и в ряде случаев приводят к потере работоспособности и устойчивости.

Режим работоспособности и устойчивого функционирования можно характеризовать гомеостатическим состоянием, при котором интегральные показатели измерительного преобразователя находятся в гомеостазе или гомеокинезе с окружающей средой, а обобщенная структура измерительного преобразователя остается неизменной во времени и в пространстве. Как правило, измерительный преобразователь может быть переведен в состояние устойчивого равновесия, путем надлежащего выбора обратной связи. Поскольку возможности любой системы по поддержанию гомеостатического состояния ограничены возможностями обратных связей, то диапазон внешних воздействий, в рамках которых измерительный преобразователь может быть работоспособен и устойчив, также ограничен.

Каждому диапазону внешних воздействий соответствует свое определенное гомеостатическое состояние. Гомеостатических состояний любой системы не может быть бесконечно много, и они не могут быть произвольными. Конечность числа

возможных состояний не позволяет добиваться от системы неких не свойственных ей (произвольных) состояний. Ограниченный, строго оцененный через определенные диапазоны интегральных показателей и внешних воздействий характер состояний системы определяется всей его внутренней структурой. Смена состояний системы сопровождается не только обязательными изменениями ее интегральных показателей, но иногда и структурными перестройками. При этом система может сохранить ряд своих наиболее важных характеристик, она остается целостной и продолжает входить в ту же систему более высокого уровня, в какую входила ранее. Большинство компонентов системы сохраняются. Физические и иные потери могут наблюдаться только на уровне элементов системы, если она гетерогенная.

При рассмотрении измерительного преобразователя как объекта некоторой системы и представлении самого измерительного преобразователя как системы, состоящей из подсистем и элементов, необходимо учитывать и оценивать возможности обратных связей всех уровней. Очевидно, что наборы обратных связей различных уровней имеют разную степень эффективности. Следует заметить, что возможности обратных связей по стабилизации внутренних состояний не безграничны. Системный подход позволяет прогнозировать, что определенная конфигурация обратных связей (в весьма широких диапазонах характеристик, объединенных этими связями подсистем, элементов) приведет к стабилизации работы системы (гомеостатическому состоянию) либо вызовет дестабилизацию работы (нарушение гомеостатического состояния). При нарушении гомеостатического состояния система теряет работоспособность (разрушается) или существенно изменяет свои свойства.

На рис. 2а-в показаны возможные типы структур измерительных преобразователей: измерительный преобразователь с разомкнутой структурой и последовательным включением преобразователей (рис. 2а), измерительный преобразователь с разомкнутой структурой и параллельным включением преобразователей (рис. 2б) и измерительный преобразователь с замкнутой структурой (рис. 2в). Структуры реальных измерительных преобразователей представляют собой один из представленных типов или комбинации из них. Необходимо заметить, что в измерительных преобразователях, как и в других видах систем, помимо явно выраженной обратной связи может быть опосредованная обратная связь.

В теории гомеостатики установлено, что в характере взаимодействия между системами или внутри них существует всего четыре основных типа отношений: партнерство, союзничество, конкуренция и нейтральность. Союзничество и партнерство относятся к кооперативным отношениям, ведущим к усилению конечного эффекта. Кроме того, возможны еще патологические взаимодействия, вызываемые конфликтными отношениями.

Партнерские отношения характерны для измерительных преобразователей с одноканальной разомкнутой структурой и последовательным включением преобразователей (рис. 2а). Выходные эффекты такого типа структуры умножаются.

При союзнических отношениях выходные эффекты складываются. Этому типу отношений соответствует преобразователь информации с многоканальной разомкнутой структурой и параллельным включением преобразователей (рис. 2б).

При конкурентных отношениях выходные эффекты полностью или частично вычитаются. Этому типу отношений соответствует измерительный преобразователь с замкнутой структурой (рис. 2в).

Нейтральные отношения характеризуются тем, что измерительные преобразователи никак не взаимодействуют друг с другом. Особенностью конфликтных отношений является то, что выходные эффекты вычитаются с возможным нарушением внутренних гомеостазов и системного гомеостаза.

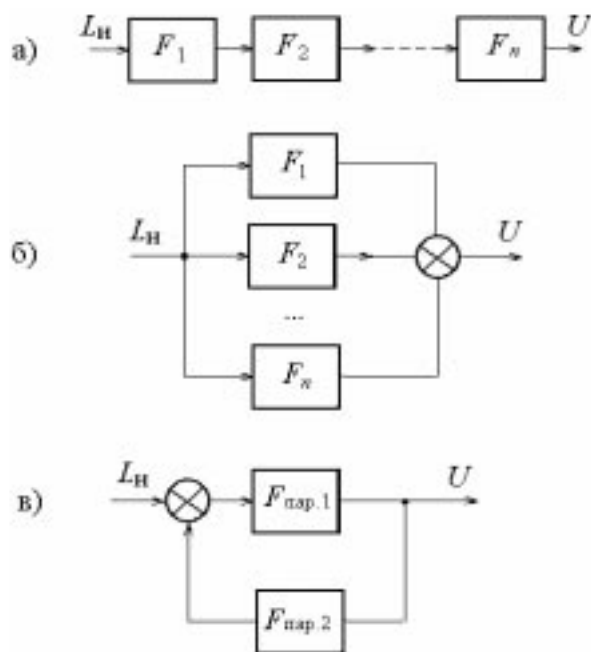


Рисунок 2. Измерительные преобразователи: а) с разомкнутой структурой и последовательным включением преобразователей; б) с разомкнутой структурой и параллельным включением преобразователей; в) с замкнутой структурой.

Обычно к измерительным преобразователям предъявляются требования линейности, стабильности, максимальной чувствительности и наименьшего времени преобразования. С целью обеспечения независимости результата преобразования от дестабилизирующих факторов в общую структуру вводят дополнительные преобразователи с определенными характеристиками и параметрами. При этом организуются связи, позволяющие минимизировать разницу между реальной и номинальной функциями преобразования. Дополнительные преобразователи со своими определенными функциями преобразования разделяют искомую функцию преобразования на ряд простых элементарных функций. Принцип разделения функций как основной принцип структурного совершенствования измерительных преобразователей сформулирован в работе [14].

Каждая из представленных структур (рис. 2а-в) имеет свои достижимые значения точности, чувствительности, быстродействия и энергии, потребляемой от источника входного сигнала. Необходимый вид соединения измерительных преобразователей определяется из условия обеспечения требуемой информационной эффективности. При этом получение максимума значения одного параметра, характеризующего эффективность, обычно сопровождается ухудшением другого и наоборот. То есть происходит качественный обмен между параметрами. Чаще всего встречаются следующие случаи качественного обмена:

- чувствительности на быстродействие;
- чувствительности на погрешность;
- точности на экономическую эффективность;
- быстродействия на точность.

Согласно закону единства и борьбы противоположностей сохранению устойчивости измерительного преобразователя могут способствовать противоречия. Как известно, на принципах управления противоположностями системы строится гомеостат, и его важнейшим элементом является управляемое внутреннее противоречие. Гомеостат – устройство, способное поддерживать некоторые свои характеристики в допустимых пределах. Понятие гомеостата как устройства управления, обеспечивающего поддержание гомеостаза, было введено У.Р. Эшби [15] и распространено на функции головного мозга. Н. Винер распространил понятие гомеостаза на социальные системы [16]. Исследования гомеостатики углубляются в механизмы гомеостатического управления [13]. Управление внутренними противоречиями в гомеостатических структурах может обеспечить как ультраустойчи-

вость системы, так и повышение качества ее функционирования.

Управление в данном случае может быть определено как регулирующая деятельность, осуществляемая на основе полученной информации о нарушении равновесия и направленная на удержание системы в области устойчивого равновесия. Требуемый уровень управления определен законом необходимого разнообразия Эшби, который основан на математической теории связи Шеннона [17]. Данный закон постулирует необходимость соответствия возможностей индивидуума или управляющего органа по обработке информации и той информации, которая предоставляется ему системой для выработки управляющих воздействий. Закон необходимого разнообразия утверждает, что для управления системой управляющий орган должен быть способен к восприятию по крайней мере того же количества различных сигналов, какое может появиться на выходе управляемой им системы.

Для сохранения работоспособности и устойчивости измерительного преобразователя при внешнем воздействии прежде всего должны быть уменьшены неблагоприятные последствия этого воздействия. В каждом случае решение такой задачи требует всестороннего изучения возникающей проблемы. К примеру, в тензорезисторных датчиках давления, предназначенных для работы в высокотемпературных средах, возникает проблема защиты тензочувствительных элементов от воздействия температуры. В конструкции датчика давления [18] неблагоприятные последствия воздействия температуры уменьшаются за счет удаления тензорезисторов от мембраны и установки их на измерительной балке, которая механически связана посредством гибкой тяги через шток с мембраной (воспринимающей давление). Кроме того, внутренняя полость датчика вакуумирована и в конструкцию введена перегородка (из материала с низкой теплопроводностью), установленная между мембраной и гибкой тягой, препятствующая воздействию теплового излучения на гибкую тягу и измерительную балку с тензорезисторами.

Ранее подчеркивалось, что для поддержания системы в устойчивом состоянии необходимо задействовать механизм отрицательной обратной связи. В описанной конструкции датчика [18] использован механизм опосредованной обратной связи. Уменьшение температурной погрешности от воздействия температуры измеряемой среды снижено за счет уменьшения теплопроводности между воспринимающей давление мембраной и тензорезисторами, установленными на измерительной

балке. А теплопроводность уменьшена путем уменьшения числа атомов воздуха. Уменьшение же числа атомов достигнуто путем снижения давления во внутренней полости датчика.

Гомеостатические системы могут иметь управляющий орган. Примером такой системы может служить фурье-спектрометр, содержащий измерительный преобразователь и встроенный гомеостат [19]. Управляющим органом в системе является вычислительное устройство. Вычислительное устройство совместно с управляемыми блоками усилителя низкой частоты, фазовращателя и фильтра низкой частоты в измерительном канале образуют гомеостат, который позволяет при смене режимов работы поддерживать постоянство фазы, амплитуды и времени интегрирования. Управление осуществляется при помощи вычислительного устройства на основе анализа выходного сигнала измерительного преобразователя. Этим обеспечивается повышение надежности и точности измерений в условиях действия факторов, меняющих параметры измерительного канала.

Гомеостатические системы могут и не иметь управляющего органа, а быть построенными на основе композиции противоположностей («склеивании» антагонистов). Для каждой неустойчивой системы может быть найден антагонист, который, будучи «склеенным» с этой системой, может обеспечить ее устойчивость [13].

В конструкции терморезисторного датчика давления [20] неустойчивость терморезистора используется как положительный фактор, датчик имеет нить терморезистора, температура (а следовательно, и сопротивление) которого зависит от условий теплопроводности, конвекции и излучения. С изменением давления изменяется теплопроводность газа, меняется конвективный теплообмен. Особенностью конструкции датчика давления [20] является то, что в нем для повышения чувствительности в области низкого вакуума условия конвективного теплообмена нити терморезистора изменяются с изменением давления за счет изменения угла отклонения нити от вертикали. Отклонение нити от вертикали осуществляется посредством проволочной тяги, связанной с сильфоном, воспринимающим давление. При увеличении угла отклонения нити терморезистора от вертикали повышается теплоотдача путем конвекции, за счет этого повышается чувствительность. В этой конструкции датчика изменение положения нити терморезистора позволяет повысить чувствительность.

Зависимость теплоотдачи от положения нити может играть отрицательную роль, когда датчик в

процессе эксплуатации не может находиться в стационарном состоянии. Однако, организуя определенным образом структуру чувствительного элемента, вводя противоположности, оказывается возможным уменьшить погрешность от изменения ориентации преобразователя в пространстве и достичь определенного гомеокинеза выходного параметра.

Конструкция чувствительного элемента теплоэлектрического вакуумметра [21] устроена так, что в ней нити терморезисторов имеют по три равных участка (противоположности), образующих в пространстве взаимно перпендикулярные ребра куба. Благодаря такой конфигурации терморезисторов сумма тепловых потоков трех участков изменяется минимально при различной ориентации в пространстве. Известно, что количество теплоты, отданное за счет конвективного теплообмена, зависит от угла наклона поверхности и максимально при горизонтальном положении. Количество теплоты определяется выражением:

$$Q = q \cdot S_{\text{эф}} = q \cdot S_0 (\sin \alpha), \quad (1)$$

где  $q$  – плотность теплового потока;  $S_{\text{эф}}$  – эффективная площадь теплоотдачи;  $S_0$  – площадь терморезистора;  $\alpha$  – угол между продольной осью терморезистора и нормалью. В конструкции [21] нити терморезисторов имеют по три участка с равной площадью, а плотность теплового потока  $q$  – величина постоянная для всех участков нитей. Количество тепла, отдаваемое нитью, определяется суммой количества теплоты ее участков:

$$Q_n = q \cdot S_0 (|\sin \alpha_1| + |\sin \alpha_2| + |\sin \alpha_3|), \quad (2)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  – углы между продольной осью соответствующих участков нити терморезистора и нормалью.

Сумма в выражении (2), записанная в скобках, – величина, меняющаяся от 2 до 2,44. В итоге с помощью структурной организации (введения противоположностей) достигнут гомеокинез и изменение теплового потока при различных положениях в пространстве у предлагаемой конструкции не превышает 20%. Аналогичным образом за счет структурной организации и достижения гомеокинеза повышена точность теплоэлектрического вакуумметра [22]. Определенная структурная организация позволяет достичь не только гомеокинез, но и гомеостаз. Так в конструкции теплоэлектрического преобразователя [23] нить терморезистора уложена в спиральную канавку, выполненную на сферическом каркасе, чем обеспечивается устойчивость показаний прибора при любой пространственной ориентации.

Анализ показывает, что объединение противоположностей в единую систему приводит к тому, что каждая из противоположностей становится для другой отрицательной обратной связью, обеспечивающей высокую устойчивость такой системы и самокомпенсацию проникающей помехи, действующей на входы противоположностей. Устойчивость и помехозащищенность определяются симметричностью и противоречиями. Чем более симметричны между собой объединенные противоположности и чем больше между ними величина противоречия, тем выше устойчивость и помехозащищенность.

Таким образом, использование гомеостатических структур в конструкциях измерительных преобразователей позволяет создавать преобразователи, способные самокомпенсировать проникающую помеху и поддерживать на заданном уровне информационную эффективность в условиях действия дестабилизирующих факторов. При этом системы с управляющим органом для обеспечения эффективного управления должны строиться на следующих принципах:

1. Равенства или превышения возможностей восприятия сигналов управляющим органом по сравнению с управляемой системой.

2. Равенства или превышения скорости работы управляющего органа по сравнению с управляемой системой.

3. Адекватного соответствия действий управляющего органа возможным изменениям системы (наилучший выбор управляющего воздействия на систему).

Гомеостатические структуры без управляющих органов, образуемые при «склеивании» антагонистов (как устойчивых, так и неустойчивых), должны строиться на следующих принципах:

1. Объединения противоположностей (факторов, характеристик, параметров), причем с такими знаками, чтобы для каждого антагониста его оппонент образовывал цепь обратной связи (в результате получается структура, обладающая как бы двойной отрицательной обратной связью).

2. Достаточной степени симметричности антагонистов (несимметрия характеристик и параметров антагонистов и заданий антагонистам не должна превышать определенного предела несимметрии).

3. Достаточной устойчивости антагонистов (степень неустойчивости антагонистов не должна превышать определенного критического значения).

**Список использованной литературы:**

1. Васильев В.А. Информационный ресурс регистрирующих твердотельных структур // Измерительная техника. – 2002, №7. – С. 22-24.
2. Васильев В.А. Информативное преобразование регистрирующих твердотельных структур // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2002, №9. – С. 40-43.
3. Васильев В.А. Повышение информационной эффективности датчиков // Международная научно-техническая конференция «Методы и средства измерения в системах контроля и управления». Труды конференции. Пенза, 2002. С. 6-8.
4. Информационно-структурные принципы совершенствования средств измерений / Крысин Ю.М., Михеев М.Ю., Семочкина И.Ю., Чувькин Б.В.: Монография. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та. 1999. – 134 с.
5. Васильев В.А. Уменьшение влияния дестабилизирующих факторов на информативный сигнал датчиков // Датчики и системы.– 2002, №4.– С.12-15.
6. Васильев В.А. Методы уменьшения температурной погрешности датчиков давления // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2002, №4–5.– С. 50-54.
7. Васильев В.А., Тихонов А.И. Точность и экономическая эффективность регистрирующих приборов (систем) // Автоматизация и современные технологии.– 2002, №10. – С. 38-40.
8. Васильев В.А. Классификация и методы уменьшения температурных погрешностей датчиков на основе твердотельных структур // Датчики и системы.– 2001, №12. – С. 6–7.
9. Васильев В.А., Осадчий Е.П., Тихонов А.И. Устройство для измерения давления. Авторское свид. СССР №1515081, МКИ G 01L 9/04 (Б.И. №38 от 15.10.1989 г.).
10. Хомяков Д.М., Хомяков П.М Основы системного анализа / Предисловие М.Я. Лемешева. М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова. 1996. – 108 с.
11. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. – М.: Высшая школа. 1989. – 367 с.
12. Волкова В.Н., Воронков В.А. и др. Теория систем и методы системного анализа в управлении и связи. М.: Радио и связь. 1983. – 243 с.
13. Горский Ю.М. Основы гомеостатики (Гармония и дисгармония живых, природных, социальных и искусственных систем). – Иркутск: Изд-во ИГЭА, 1998. – 337 с.
14. Шахов Э.К. Разделение функций – основной принцип структурного совершенствования измерительных преобразователей // Цифровая информационно-измерительная техника. Межвуз. сб. научн. тр. Пенза, ППИ. 1978. Вып. 8.
15. Эшби У.Р. Конструкция мозга. Происхождение адаптивного поведения: Пер. с англ. Ю.И. Лашкевича / Под ред. П.К. Анохина, В.А. Шидловского. – М.: Мир, 1964. – 411 с.
16. Винер Н. Кибернетика: М.: Сов. радио, 1968, 327 с.
17. Эшби У.Р. Введение в кибернетику: Пер. с англ. – М.: Изд-во Иностран. литры, 1959. – 432 с.
18. Тихонов А.И., Васильев В.А., Тихоненков В.А., Жучков А.И., Семенов В.А. Датчик давления. Авторское свид. СССР №1422031, МКИ G 01 L 9/04 (Б.И. №33 от 07.09.1988 г.).
19. Васильев В.А., Копылов А.А., Холодилов А.Н. Фурье-спектрометр. Авторское свид. СССР №1681171, МКИ G 01 J 3/28 (Б.И. №36 от 30.09.1991 г.).
20. Васильев В.А., Белов А.В., Тихонов А.И., Горбачева А.В. Терморезисторный датчик давления. Авторское свид. СССР №1392407, МКИ G 01 L 21/12 (Б.И. №16 от 30.04.1988 г.).
21. Тихонов А.И., Васильев В.А., Тельпов С.Е. Теплоэлектрический вакуумметр. Авторское свид. СССР №1285327, МКИ G 01 L 21/12 (Б.И. №3 от 23.01.1987 г.).
22. Тихонов А.И., Васильев В.А., Зайцев Э.М., Кулагина Л.И. Теплоэлектрический вакуумметр. Авторское свид. СССР №1177701, МКИ G 01 L 21/12 (Б.И. №33 от 07.09.1985 г.).
23. Васильев В.А., Тельпов С.Е., Тихонов А.И., Горбачева А.В. Теплоэлектрический преобразователь давления. Авторское свид. СССР №1420407, МКИ G 01 L 21/12 (Б.И. №32 от 30.08.1988 г.).