УДК 621.317

ФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ УРАВНОВЕШИВАНИЯ И ВЗАИМОСВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ ТРЕХПОЛЮСНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Галкин Л.А.

Исследуются физические аспекты оценки динамических свойств первичного трехполюсного измерительного преобразователя (ТПИП) с выходным электрическим сигналом, чувствительного к двум различной природы физическим величинам (ФВ), измерительной и уравновешивающей, применяемого в информационно-измерительных системах контроля неэлектрических величин (НЭВ). ТПИП рассматривается как термодинамическая система с тремя степенями свободы, взаимодействующая с «окружающей средой» через воздействия разного рода. Каждому воздействию Q_i соответствует своя координата x_i, определяющая количественную меру происходящего в системе процесса и свой потенциал P_i, количественно характеризующий движущую причину процесса, связанные соотношением

$$dQ_i = P_i \cdot dx_i, \qquad (1)$$

где dQ_i – воздействие физической величины (ФВ) на ТПИП;

P_i – потенциал, возникающий в результате воздействия;

dx_i – координата, соответствующая природе воздействия ФВ

Воздействие от «окружающей среды» системе «ТПИП» передается по каждой степени свободы через контрольную поверхность, представляющую собой границу раздела преобразователь - объект. Разность соответствующих потенциалов внутри преобразователя P_i и вне его P_i^e на контрольной поверхности является движущей силой процесса /[1]/ :

$$P_i^e - P_i = \pm\Delta P_i \to 0, \qquad (2)$$

где $\pm\Delta P_i$ -интенсивность воздействия. Знаки определяют направление уравновешивания для активного и пассивного ТПИП.

При условии $\Delta P_i \neq 0$ в системе возникает процесс движения координат, определяющих изменение энергетического состояния системы, для описания которого используем уравнение Лагранжа /[2]/:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial E_k}{\partial x_i'}\right) - \frac{\partial E_k}{\partial x_i} + \frac{\partial E_h}{\partial x_i} + \frac{\partial G_p}{\partial x_i'} = F_i, \qquad (3)$$

где X_i - обобщенная координата;

X_i' – обобщенная скорость по i – ой координате;

$E_k = E_k\left(t, x_1, x_2, \ldots x_n; x_1', x_2', \ldots x_n'\right)$ – кинетическая энергия;

$E_h = E_h\left(x_1, x_2, \ldots x_n\right)$ – потенциальная энергия;

G_p – функция рассеяния Релея;

F_i – обобщенная составляющая воздействия; сила, стремящаяся изменить координату состояния ТПИП;

---

[1] Гухман А.А. Об основах термодинамики. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 384 с.

[2] Савельев И.В. Основы теоретической физики. Т.1. – М.: Наука, 1975. – 240 с.

$\frac{\partial E_h}{\partial x_i}$ – консервативные силы;

$\frac{\partial G_p}{\partial x_i'}$ – диссипативные силы.

Уравнение (3) составляется для каждой обобщенной координаты, число которых соответствует числу степеней свободы термодинамической системы, коей рассматривается ТПИП.

Движение системы ТПИП, взаимодействующей с объектом измерения, который входит в систему «окружающая среда», соответствует процессу перехода из статического состояния 1 в неравновесное и затем в новое статическое состояние 2 с отличными от состояния 1 условиями сопряжения с «окружающей средой». При этом степень свободы, по которой произошло взаимодействие, закрепляется, то есть координата, соответствующая данной степени свободы, в дальнейшем не изменяется.

В статическом состоянии системы интенсивность воздействия стремится к нулю ($\pm\Delta P_i \to 0$) и уравнение (3) будет выглядеть

$$\frac{\partial E_h}{\partial x_i} - \frac{\partial E_k}{\partial x_i} = F_i \qquad (4).$$

Однако, частная производная кинетической энергии по координате в равновесном состоянии и вблизи него представляет величину второго порядка малости, так как $dx_i/dt \to 0$, поэтому уравнение (4) можно представить в виде

$$\frac{\partial E_h}{\partial x_i} = F_i \qquad (5).$$

Левая часть соотношения (5) представляет производную потенциальной энергии, которая является функцией только обобщенных координат, и с учетом (1) связана с элементарной работой в потенциальном силовом поле соотношением

$$\delta A = F \cdot dx = -dU(x), \qquad (6)$$

характеризующую внутреннюю энергию системы. Так как обобщенная сила связана с потенциалом соотношением /[3]/:

$$P_i^e = -F_i, \qquad (7)$$

то соотношение (5) возможно выразить через потенциалы в виде:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial x_i}\right) = P_i^e \qquad (8)$$

и записать полный дифференциал функции состояния в таком виде:

$$dU = \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial U}{\partial x_i}\right)_{x_i} \cdot dx_i = \sum_{i=1}^{n} P_i^e \cdot dx_i, \qquad (9)$$

или с учетом (2) соотношение (9) можно представить в виде

$$dU = \sum_{i=1}^{n} P_i^e \cdot dx_i - \sum_{i=1}^{n} \Delta P_i \cdot dx_i, \qquad (10)$$

которое справедливо только для статического состояния системы ТПИП.

Из соотношений (8)-(10) следует:

1. Условие статичности системы - есть равенство потенциалов окружающей среды и системы ТПИП на всех контрольных поверхностях;

[3] Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Статистическая физика. –М.: Наука, 1964, -567 с.

2. Потенциалы представляют собой частные производные от внутренней энергии по соответствующей координате;

3. При $\sum_{i=1}^{n}\Delta P_i \cdot dx_i \to 0$ процесс, совершаемый системой, есть последовательная смена бесконечно близких состояний равновесия, то есть квазистатический процесс, который обратим. Это означает, что малая вариация внешних условий (малое изменение внешних потенциалов) приводит к изменению направления процесса, но не к изменению абсолютной величины работы, количеству теплоты. Поэтому количественные результаты будут одинаковы при любом знаке $\sum_{i=1}^{n}\Delta P_i \cdot dx_i \to 0$, хотя направление процесса различно. Из свойств квазистатического процесса вытекает, что при наложении изоляции процесс мгновенно прекращается и система оказывается в состоянии равновесия;

4. В квазистатическом процессе отсутствуют потери энергии $\left(\frac{\partial E_h}{\partial x_i'}\right) = 0$;

5. Элементарные воздействия $P_i^e \cdot dx_i$ входят в равенство (9) под знаком суммы, и могут иметь на разных контрольных поверхностях противоположные направления, то есть для ТПИП, тем самым, возможна компенсация реакции на воздействие.

Следствия 1 и 5 позволяют считать процесс уравновешивания в преобразователе с тремя степенями свободы – ТПИП, как установление статического состояния 3, при котором минимум на двух контрольных поверхностях существуют равновесные условия. Условие уравновешивания, с учетом (2), запишется в виде

$$(P_1^e - P_1) + (P_2^e - P_2) = 0, \qquad (11)$$

где $P^e_{1,2}$ - входное и уравновешивающее воздействия соответственно;

$P_{1,2}$ - внутренние противодействия в ТПИП.

Процесс уравновешивания представляет собой установление статического состояния, которое выполняется в двух случаях:

$$\text{а)}\ \left(\left|P_1^e\right| + \left|P_2^e\right|\right) = \left(\left|P_1\right| + \left|P_2\right|\right),$$

$$\text{б)}\ \left(P_1^e - P_2^e\right) = 0, \qquad (12)$$

где /…/ - обозначает модуль величины потенциала P_i.

Случай а) реализуется в измерительных параметрических преобразователях, а для ТПИП определяет условия сопряжения его с объектом измерения и уравновешивающим воздействием.

В термодинамике различают три вида сопряжения: *по координатам, по потенциалам и смешанное* [4]. Рассмотрим эти виды сопряжения, применительно к ТПИП - термодинамической системе с тремя степенями свободы.

Случай сопряжения по координатам. Полный дифференциал характеристической функции $\psi(x_i) = U(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ соответствует соотношению (9), из которого определяются потенциалы системы как частные производные от внутренней энергии:

$$P_i = \left(\frac{\partial U}{\partial x_i}\right)_{X_{INV}} \qquad (13)$$

При выбранных произвольно двух потенциалах P_i и P_j, по соотношению (13), продифференцируем их, в соответствии с принципом взаимности:

[4] В.Ф. Леонова. Термодинамика, -М.: Высшая школа, 1968. – 158 с.

$$\left(\frac{\partial P_i}{\partial x_j}\right)_{X_{INV}} = \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x_j \cdot \partial x_i}\right)_{X_{INV}} ; \quad \left(\frac{\partial P_j}{\partial x_i}\right)_{X_{INV}} = \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x_i \cdot \partial x_j}\right)_{X_{INV}} .$$

В силу равенства правых частей уравнения будут равны и его левые части

$$\left(\frac{\partial P_i}{\partial x_j}\right)_{X_{INV}} = \left(\frac{\partial P_j}{\partial x_i}\right)_{X_{INV}} \tag{14}$$

Очевидно, действительно и обращенное соотношение

$$\left(\frac{\partial x_j}{\partial P_i}\right)_{X_{INV}} = \left(\frac{\partial x_i}{\partial P_j}\right)_{X_{INV}} \tag{15}$$

Как следует из (14) и (15) при вычислении частных производных от одного параметра по другому координаты состояния системы остаются постоянными.

Случай сопряжения по потенциалам. Характеристическая функция имеет следующий вид:

$$\Psi(P_i) = U - \sum_{i=1}^{n} P_i \cdot x_i \ . \tag{16}$$

Ее полный дифференциал равен

$$d\Psi(P_i) = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial P_i}\right)_{P_{inv}} \cdot dP_i = -\sum_{i=1}^{n} x_i \cdot dP_i \ , \tag{17}$$

из которого определяются координаты состояния через частные производные характеристической функции по потенциалам

$$x_i = \left(-\frac{\partial \Psi}{\partial P_i}\right)_{P_{inv}} . \tag{18}$$

Дифференциальные соотношения запишем, применив выше рассмотренный прием:

$$\left(\frac{\partial x_i}{\partial P_j}\right)_{P_{inv}} = -\left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial P_j \cdot \partial P_i}\right)_{P_{inv}} ; \qquad \left(\frac{\partial x_j}{\partial P_i}\right)_{P_{inv}} = -\left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial P_i \cdot \partial P_j}\right)_{P_{inv}} ,$$

и используя равенство вторых смешанных производных, получим прямое и обращенное соотношения:

$$\left(\frac{\partial x_i}{\partial P_j}\right)_{P_{inv}} = \left(\frac{\partial x_j}{\partial P_i}\right)_{P_{inv}} ; \quad \left(\frac{\partial P_j}{\partial x_i}\right)_{P_{inv}} = \left(\frac{\partial P_i}{\partial x_j}\right)_{P_{inv}} , \tag{19}$$

Соотношения (19) определяют поведение одной координаты состояния при изменении другой, когда потенциалы системы сохраняются постоянными.

Случай смешанного сопряжения. Характеристическую функцию для этого случая запишем в виде

$$\Psi(x_j, P_i) = U - \sum_{i=1}^{m} P_i \cdot x_i , \text{ где m< n} \tag{20}$$

а ее полный дифференциал в виде

$$d\Psi(x_j, P_i) = -\sum_{i=1}^{m} x_i \cdot dP_i + \sum_{j=m+1}^{n} P_j \cdot dx_j , \tag{21}$$

из которого определим координаты и потенциалы:

$$x_i = -\left(\frac{\partial \Psi}{\partial P_i}\right)_{X_{inv}}^{P_{inv}}; P_j = \left(\frac{\partial \Psi}{x_j}\right)_{P_{inv}}^{X_{inv}}; \qquad (22)$$

где i = 1,2,…, m; j = m+1, m+2,…, n.

Соотношения (22) определяют параметры состояния x_i и P_j через частные производные от характеристической функции $\Psi(x_j, P_i)$ по координатам и потенциалам. Дифференциальные соотношения получим образуя вторые смешанные производные дифференцированием x_i по P_j и P_j по x_i

$$\left(\frac{\partial x_i}{\partial x_j}\right)_{P_i} = -\left(\frac{\partial P_j}{\partial P_i}\right)_{X_j}, \qquad (23)$$

позволяющее найти изменения координаты при постоянстве потенциалов и наоборот.

Таким образом, основное условие уравновешивания (11) реализуется при постоянстве координат состояния ТПИП (15), потенциалов (19), или постоянства части координат и части потенциалов (23).

Рассмотрим процесс формирования выходного сигнала ТПИП, который обменивается с окружающей средой только энергией. В статическом состоянии 1 преобразователь, как замкнутая система, изолирован от “окружающей среды” и на всех его контрольных поверхностях, включая выходную, существует динамическое равновесие, то есть отсутствует разность внешнего и внутреннего потенциалов, что можно рассматривать как равенство

$$\sum P_i^e = \sum P_i = 0; P_i^e = P_i = 0, \qquad (24)$$

где $P_i = P_i(x_1, x_2, ..., x_n)$ - потенциалы на контрольной поверхности.

При включении измерительной процедуры на контрольной поверхности, соответствующей входу ТПИП, действует внешний потенциал $P_{1i}^e \neq 0,$ который вызвает изменение одной из координат состояния x_i, одинаковой физической природы с внешним потенциалом. В результате изменения координаты x_i в преобразователе возник противоположный внешнему внутренний потенциал P_{1i}, уравновешивающий внешний потенциал на входной контрольной поверхности. Появление внутреннего потенциала P_{1i} нарушает условия равновесия ТПИП, которые в статическом состоянии 2 обязаны соблюдаться, а параметр x_i должен иметь одно и то же значение во всех точках ТПИП. Поэтому возникает внутренний потенциал P_k, компенсирующий возникшее состояния неравновесия, приложенный к выходной контрольной поверхности. Он уравновешивается внешним потенциалом P_i^e, совершающим работу над «окружающей средой». Таким образом, во всей мегасистеме «окружающая среда (объект измерения) - ТПИП» общее количество энергии сохраняется, а система ТПИП входит в статическое состояние 2 - новое равновесное состояние с новыми условиями сопряжения с «окружающей средой». Выходной внешний потенциал P_{1i}^e формирует выходной сигнал ТПИП – системы, которая преобразует энергию из одного вида и природы в другой вид и природу и ретранслирует ее со входа на выход ТПИП. Условия равновесия системы в этом случае можно представить в виде

$P_{1i}^e = P_{1i}, \rightarrow P_{1i} = \alpha P_{1k}$, при $x_i = const$, но $P_{1i}^e \neq P_{1k}^e$ при $\Phi > 0$,

где Φ - производство энтропии;

I, k - индексы входной и выходной контрольных поверхностей;

α - коэффициент ретрансляции энергии со входа на выход ТПИП.

При воздействии на уравновешивающий вход преобразователя потенциала P_{2J}^e протекает поцесс, аналогичный описанному. Отличие его состоит в том, что второй внутренний потенциал P_{2J},

вызывающий на выходной контрольной поверхности потенциал βP_{2K} (где β - коэффициент ретрансляции энергии с уравновешивающего входа на выход ТПИП), может как суммироваться, так и вычитаться в зависимости от направления взаимных изменений внутренних координат x_i и x_j, определяющих внутренние потенциалы. В результате значение внешнего потенциала на выходной контрольной поверхности можно выразить в следующем виде

$$\Delta P_{2k} = P_{1K} \pm P_{2K} = P^e_{1K} \pm P^e_{2K} = \Delta P^e_K \quad \text{при } \Psi \geq 0, \tag{25}$$

который формируется как выходной сигнал ТПИП.

Как видим оба стационарных состояния 2 и 3 определяются разными статическими состояниями с определенными условиями сопряжения с «окружающей средой», а выходной сигнал преобразователя равен полному дифференциалу от внешних воздействий, частные производные которого могут быть взяты по потенциалам, по координатам или по тем и по другим:

$$\begin{aligned} P^e_k &= f_1(P_i, P_j); \qquad x_k = f_1(P_i, P_j); \\ P^e_k &= f_2(P_i, x_j); \qquad x_k = f_2(P_i, x_j); \\ P^e_k &= f_3(x_i, x_j); \qquad x_k = f_3(x_i, x_j). \end{aligned} \tag{26}$$

Соотношения (26) определяют взаимосвязи между воздействующими величинами – измеряемой и уравновешивающей, действующих по разным входам ТПИП, между ними и координатами системы ТПИП, которые и могут служить критериями отбора природы уравновешивающих величин при заданой природе входных воздействий.

Основой критерия отбора может быть понятие «физического свойства определенной природы», которое характеризует взаимосвязь между воздействиями по измерительному и уравновешивающему входам и изменением внутреннего состояния ТПИП. Каждое свойство можно определять как связь между парой термодинамически сопряженных параметров – интенсивного и экстенсивного и численно характеризовать отношением малых приращений (частных производных) параметров. Например, для диэлектрической проницаемости $\varepsilon = \left(\frac{\partial D}{\partial E}\right)_P$, здесь через D обозначена электрическая индукция, а через E напряженность электрического поля/[5]/.

Динамические свойства ТПИП будем оценивать в нестационарном состоянии (в переходном процессе) по скорости установления нового статического состояния 2 и 3, определяемого временем релаксации t_p.

Основной характеристикой переходного процесса будем рассматривать производство энтропии, которое определяет состояние и величину диссипации энергии ТПИП в окружающую среду /[6]/:

$$\Phi_p = T \cdot dS/dt = 0{,}5 \sum \sum R_{ij} \cdot x_i \cdot x_j \tag{27}$$

где T - температура ^oK;

Φ_p - функция рассеяния Релея; t - время, сек;

R_{ij} - кинетические коэффициенты сопротивления движению системы в переходном процессе;

x_i, x_j - обобщенные координаты состояния ТПИП.

Перевод ТПИП в новое стационарное состояние происходит в случае сообщения ему кинетической энергии, расходуемой на преодоление сил инерции и сопротивления движению:

$$Э_к = 0{,}5 \sum \sum m_{ij} \cdot x_i \cdot x_j \tag{28}$$

где m_{ij} - коэффициенты, характеризующие инерционные свойства

ТПИП (имеют смысл массы).

Отношение кинетической энергии (28) к диссипатирующей (27) характеризует время перехода ТПИП из одного в другое стационарное состояние, то есть его динамические свойства:

---

[5] Сычев В.В. Сложные термодинамические системы.-М.-Энергоатомиздат, 1986 г., с207.

[6] Петров Б.Н. и др. Принцип инвариантности в измерительной технике. М.: Наука 1978.223 с.

$$\tau_p = \frac{Э_к}{Ф_p} = \frac{m_{ij} \cdot x_i' \cdot x_j'}{R_{ij} \cdot x_i' \cdot x_j'} \qquad (29)$$

Если полный диапазон воздействий на ТПИП записать в виде

$$P_d = P \pm \Delta P, \qquad (30)$$

где ΔP – пороговое значение воздействия, при котором не фиксируется изменение (появление) выходного сигнала,

P^e_d – максимальное значение воздействия;

тогда полный диапазон преобразования определяется соотношением

$$D = (P^e_d/\Delta P) + 1 \qquad (31)$$

Полагая минимальную относительную погрешность $\Delta P/P^e_d$ не превышающей некоторой величины $\pm \varepsilon$, можно записать пороговое значение воздействия в таком виде

$$\Delta P = 2\varepsilon P^e_d, \qquad (32)$$

тогда, минимальное время, за которое выходной сигнал изменится от минимального до максимального значения равно

$$\tau_x = P^e_d/(dP/dt)_{max}, \qquad (33)$$

а минимальное время его изменения на размер порога чувствительности

$$\Delta\tau = \Delta P/(dP/dt)_{max}, \qquad (34)$$

Подстановкой (32) в (34) получим соотношение взаимосвязи точности и быстродействия ТПИП

$$\Delta\tau = 2\varepsilon\tau_p. \qquad (35)$$

Соотношение справедливо только в случае запаздывания уравновешивающего воздействия на время не более $\Delta\tau$, которое определяется физическими параметрами самого ТПИП.

Оценим необходимое быстродействие уравновешивающего процесса при различной скорости изменения входного воздействия (dP/dt). С учетом выражения (29) и (35), запишем следующий ряд неравенств:

1) $\tau_x >> \tau_p$ - измеряемая величина квазипостоянна;

2) $\tau_x > \tau_p$ - медленно изменяющаяся;

3) $\tau_p \geq \tau_x \geq \tau_g$ - переменная;

4) $\tau_g > \tau_x \geq \tau_n$ - быстропеременная;

5) $\tau_n > \tau_x$ - сверхбыстродействующая.

Здесь τ_n - время установления стационарного потока в преобразователе; а τ_g - время установления динамического равновесия со средой, связаны соотно-шением:

$$\tau_p = \tau_n + \tau_g. \qquad (36)$$

Введение такого разделения входного воздействия по переменности позволяет установить требования к динамическим характеристикам ТПИП с уравновешиванием его реакции сопряженной величиной.

Измерительное преобразование постоянных и медленно изменяющихся входных величин осуществляется преобразователями, особенности структуры и конструкции которых определяются необходимостью точного преобразования значения измеряемого воздействия в присутствии флуктуаций, "шума" на граничных (контрольных) поверхностях ТПИП (флуктуации воздействия или в самом преобразователе)/[7]/. Описание случайных процессов производится с помощью стандартной функции - Гауссов шум, представляемый как сумма мгновенных независимых элементарных процессов, следующих в случайном порядке друг за другом, так что среднее их значение равно нулю.

[7] Гленсдорф П.,Пригожин И. Термодинамическая теория структур устойчивости и флуктуаций.- М.:Мир,1973 г.- 280 с.

Равенство нулю среднего значения гауссова шума достигается при достаточно длительном времени измерения. В силу того, что флуктуации не влияют на изменение величины диссипатирующей энергии, и, следовательно, на частоту уравновешивания в установившемся стационарном состоянии не накладываются жесткие требования:

$$f_\Omega < 1/\tau_P \qquad (37)$$

Скорость изменения состояния преобразователя при такой частоте значительно ниже скорости релаксации, т.е. на любом этапе этого процесса значения всех параметров преобразователя успевают установиться. Использование такого режима позволяет исключить влияние изменения параметров преобразователя при большой длительности измерительного процесса, так как изменение (производство) энтропии определяется характером воздействия на него со стороны ФВ/[8]/.

Время установления потоков энергии зависит от микроструктуры материалов, веществ, используемых в ТПИП/[9]/. Его передаточные способности "от входа к выходу" определяются геометрией/[10]/ и могут быть представлены на основе анализа физических свойств следующим рядом

$$\tau_T^{\,г} > \tau_T^{\,ж} > \tau_т^{\,тт} > \tau_п > \tau_а^{\,г} > \tau_а^{\,ж} > \tau_а^{\,тт} > \tau_м^{\,тт} > \tau_э^{\,ж} > \tau_о^{\,тт} > \tau_о^{\,ж} > \tau_о^{\,г}$$

где (г, ж, тт) - верхний значок означает принадлежость к состоянию вещества: г - газ, ж - жидкость, тт - твердое тело;

нижний значок м, в, т, р, э, о, а - соответствует характеру воздействия: гидродинамическое - в, т - тепла,
р - механическое, а - акустическое, э - электрическое, м - магнитное, о - электромагнитное.

"Ряд быстродействия" позволяет достичь максимального быстродействия ТПИП выбором уравновешивающей ФВ, стоящей правее измеряемой. Граница использования квазистатических режимов работы ТПИП определяется сравнимостью времени изменения значения скорости производства энтропии со временем установления стационарных потоков в нем:

$$f_\Omega < 1/\tau_n \qquad (38)$$

Это неравенство определяет частотный предел прерываний в случае применения метода периодического уравновешивания[11] для измерения неэлектрических ФВ /12-15/.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гухман А.А. Об основах термодинамики.– М.:Энергоатомиздат, 1986.–384 с.
2. Савельев И.В. Основы теоретической физики. Т.1. – М.: Наука, 1975.–240 с.
3. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Статистическая физика. – М.: Наука, 1964, -567 с.
4. В.Ф. Леонова. Термодинамика, -М.: Высшая школа, 1968. – 158 с.
5. Сычев В.В. Сложные термодинамические системы.-М.-Энергоатомиздат, 1986 г., - с 207.
6. Петров Б.Н. и др. Принцип инвариантности в измерительной технике. - М.: Наука 1978.- 223 с.
7. Гленсдорф П.,Пригожин И. Термодинамическая теория структур устойчивости и флуктуаций.- М.:Мир,1973 г.- 280 с.
8. Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах. - М.: Мир, 1979, - 271 с
9. Физические величины: Справочник.- Энергоатомиздат,1991, с1232.
10. Галкин Л.А. Методы контроля неэлектрических величин с уравновешиванием. Докт. дис.1995, НТТУ «КПИ» Украины, - С 292.

[8] Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах. М.: Мир, 1979,- 271 с

[9] Физические величины: Справочник.- Энергоатомиздат,1991, с1232.

[10] Галкин Л.А. Методы контроля неэлектрических величин с уравновешиванием. Докт. дис.1995, НТТУ «КПИ» Украины, - С 292.

[11] Головко Д.Б., Галкин Л.А. и др. «Засоби вимірювань з автоматичним зрівноважуванням» Київ, «Либідь»,1995 р. - с 287.

11. Головко Д.Б., Галкин Л.А. и др. «Засоби вимірювань з автоматичним зрівноважуванням» Київ, «Либідь»,1995 р. - с 287.

12. Галкин Л.А., Падалко А.В., Горовой Е.А. Расходомер жидкостей и газов. А.С. № 1620844, Б.И. № 23, 1991.

13. Галкин Л.А. Устройство измерения температуры. А.С. № 1578513, Б.И.№22, 1990.

14. Галкин Л.А., Березненко Н.П., Скрипник Ю.А. и др. Способ определения температурного поля. А.с. №1765716, Б.И. № 36, 1992.

15. Галкин Л.А. Способ бесконтактного измерения толщины. А.С. 31523914, Б.И. № 43, 1989.