

А. Б. Бушуев, канд. техн. наук, доц., bushuev@inbox.ru, **В. И. Бойков**, канд. техн. наук, доц., viboikov@mail.ru,
С. В. Быстров, канд. техн. наук, доц., sbystrov@mail.ru,
В. В. Григорьев, д-р техн. наук, проф., grigvv@yandex.ru,
 Национальный исследовательский университет ИТМО, г. Санкт-Петербург,
О. К. Мансурова, канд. техн. наук, доц.,
 Санкт-Петербургский горный университет

Синтез оптимальных информационно-энергетических схем измерительно-преобразовательных устройств

Задача синтеза информационно-энергетических схем ставится как экстремальная задача, целью которой является построение взвешенного ориентированного графа минимальной длины от входной величины до выходной величины измерительно-преобразовательного устройства. Граф имеет несколько вершин, которыми являются блоки информационно-энергетической схемы. Ребрами графа являются физические величины, связывающие входы и выходы блоков. Математически ребра задаются квадратными диагональными матрицами, содержащими размерности величин в принятой системе измерения физических величин. Вершины графа задаются передаточными матрицами, равными произведению матрицы выходного ребра на обратную матрицу входного ребра. Вес элементов графа определяется нормой матриц, зависящей от показателей степени при основных единицах системы измерений. Полученная в результате синтеза схема пригодна для использования в технической документации для объяснения физического принципа действия устройства, а также для патентной защиты.

Функция любого блока схемы по преобразованию входной величины в выходную называется физическим эффектом. Передаточная матрица является математической моделью размерностей физического эффекта. В усиленной постановке экстремальной задачи вводятся численные значения входных и выходных величин блоков, которые являются ограничениями в экстремальной задаче. В этом случае размер передаточных матриц вершин и матриц ребер расширяется на единицу. Добавленный элемент на диагонали в передаточной матрице вершины является статическим коэффициентом передачи физического эффекта, а полученная матрица является статической моделью физического эффекта. В динамической модели физического эффекта в передаточной матрице вершины вместо статического коэффициента передачи записывается передаточная функция динамического звена, которое является динамической моделью физического эффекта. В результате передаточная матрица вершины содержит информацию не только о динамических свойствах эффекта, но и о размерностях физических величин на его входе и выходе.

Ключевые слова: информационно-энергетическая схема, граф физического принципа действия, передаточная матрица физического эффекта, имитационное моделирование размерностей

Введение

На первом этапе проектирования измерительно-преобразовательных устройств (ИПУ) синтезируется структура устройства в виде функциональных, информационно-энергетических, принципиальных схем. Структурные схемы входят в техническую документацию, используемую при изготовлении и эксплуатации ИПУ, а также для защиты новых физических принципов действия (ФПД) патентами на изобретения.

Информационно-энергетические схемы (ИЭС) задают цепочки преобразования входных измеряемых физических величин в выходные величины, удобные для дальнейшего использования. Элементами цепочек или блоками схемы являются устройства, реализующие тот или иной физический эффект. Бинарные отношения между блоками определяют связи в ИПУ. Математическим аппаратом для

формализации структурных схем ИПУ служит теория графов.

Формализованное представление цепочки физических эффектов в виде направленного графа известно из трудов М. Ф. Зарипова и его школы [1]. Дальнейшее развитие этого подхода представлено в работах [2, 3]. Для математического описания любой вершины графа используется дифференциальное уравнение термодинамики $dQ = PdE$, где dQ — дифференциал обобщенной работы, P — обобщенная сила, dE — обобщенная координата. В работе [4] граф физического эффекта имеет структуру типа $A \rightarrow B \rightarrow C$, где A — вход, B — физический объект, C — результат воздействия (выход). Для автоматического поиска физического эффекта используется тезаурус для объектов A, B, C , входящий в специальный язык поиска информации (IRL). В работах [5, 6] рассмотрены алгоритмы работы этого языка и метод извлечения данных из базы физических эффектов.

Следующее направление в использовании графов физических эффектов в структурных моделях ИПУ связано с теорией размерности физических величин. В работе [7] используется система размерностей физических величин с основными единицами *MLT* (масса, длина, время). Топология технической системы представляется графом, вершинами которого являются переменные трех типов: системные переменные, входные и выходные переменные. По экспертной оценке причинно-следственных связей строятся ребра графа. Матрица графа в базе *MLT* используется для проверки достоверности структурной модели и отыскания вершин с нарушением причинно-следственных связей.

В статьях [8, 9] ребрами графа ИЭС являются квадратные 2×2 матрицы размерностей физических величин в базе *LT* (длина, время) Бартини [10], а вершинами — так называемые передаточные матрицы, задающие тип физического эффекта преобразования входной величины в выходную величину. Последовательности графов физических эффектов строятся на клетках *LT*-таблицы Бартини. Целью оптимального синтеза является суммарный граф наименьшей длины.

В настоящей статье также решается задача поиска экстремума, т. е. графа минимальной длины, задающего ФПД для ИПУ, но в базе произвольной размерности, зависящей от размерности принятой системы измерения физических величин. В частности, для Международной системы единиц измерений СИ матрицы размерностей физических величин будут иметь 7 строк и 7 столбцов,

Задача поиска экстремума рассматривается в двух постановках. Первая постановка представляет собой поиск минимума с ограничениями на существование физических эффектов, реализуемых отдельными блоками структуры. Результатом поиска является ИЭС для ИПУ. Оптимальная ИЭС представляет последовательность минимальной длины из блоков, реализующих тот или иной физический эффект, для которого известны только его название и входные и выходные физические величины. Решение такой задачи уже пригодно для защиты в патентах новой структуры ИПУ.

Во второй постановке в экстремальной задаче добавляются численные ограничения, такие как диапазоны изменения измеряемых и преобразуемых величин, статические и динамические показатели физических эффектов.

Постановка задачи

Размерность $[x]_j$ входной физической величины x_j и размерность $[y]_j$ выходной величины y_j j -го блока ИПУ, реализующего тот или иной физический эффект, заданы в виде

$$\begin{aligned} [x]_j &= [A_1^{b_{1,j}} A_2^{b_{2,j}} \dots A_i^{b_{i,j}} A_{i+1}^{b_{i+1,j}} \dots A_k^{b_{k,j}}], \\ [y]_j &= [A_1^{c_{1,j}} A_2^{c_{2,j}} \dots A_i^{c_{i,j}} A_{i+1}^{b_{i+1,j}} \dots A_k^{c_{k,j}}], \end{aligned} \quad (1)$$

где A_i — известные размерности основных физических величин в принятой для поиска системе размерностей, причем $A_i \neq 0$, $i = 1, 2, \dots, k$, где k — число основных единиц системы размерностей, $j = 1, 2, \dots$, где j — номер блока, $b_{i,j}$ $c_{i,j}$ — показатели степени, вещественные числа.

Зададим входную матрицу \mathbf{X}_j и выходную матрицу \mathbf{Y}_j в виде квадратных симметричных диагональных матриц размером $k \times k$ с главными диагоналями соответственно вида

$$\begin{aligned} \text{diag} \mathbf{X}_j &= [A_1^{b_{1,j}}, A_2^{b_{2,j}}, \dots, A_i^{b_{i,j}}, A_{i+1}^{b_{i+1,j}}, \dots, A_k^{b_{k,j}}], \\ \text{diag} \mathbf{Y}_j &= [A_1^{c_{1,j}}, A_2^{c_{2,j}}, \dots, A_i^{c_{i,j}}, A_{i+1}^{b_{i+1,j}}, \dots, A_k^{c_{k,j}}], \end{aligned}$$

с остальными элементами матриц — нулевыми, т. е.

$$\mathbf{X}_j = \begin{bmatrix} A_1^{b_{1,j}} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & A_k^{b_{k,j}} \end{bmatrix}, \mathbf{Y}_j = \begin{bmatrix} A_1^{c_{1,j}} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & A_k^{c_{k,j}} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Введем передаточную матрицу $\mathbf{W}_j(\mathbf{d}_j)$ j -го блока от входа \mathbf{X}_j к выходу \mathbf{Y}_j :

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_j(\mathbf{d}_j) &= \mathbf{Y}_j(\mathbf{X}_j)^{-1} = \\ &= \begin{bmatrix} A_1^{c_{1,j}-b_{1,j}} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & A_k^{c_{k,j}-b_{k,j}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1^{d_{1,j}} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & A_k^{d_{k,j}} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\mathbf{d}_j = \{d_{1,j}, d_{2,j}, \dots, d_{i,j}, d_{i+1,j}, \dots, d_{k,j}\}$ — конечное множество показателей степеней размерностей диагональных элементов A_i матрицы $\mathbf{W}_j(\mathbf{d}_j)$, $d_{i,j} = c_{i,j} - b_{i,j}$, при $d_{i,j} = 0$, $i = 1, 2, \dots, k$, получаем единичную диагональную матрицу $\mathbf{W}_j(\mathbf{d}_j) = \mathbf{E}$.

Представим цепочку из q штук последовательно соединенных блоков в виде произведения соответствующих передаточных матриц. Тогда матрицу выходной величины цепочки \mathbf{Y}_q можно записать в виде

$$\mathbf{Y}_q = \mathbf{W}_1(\mathbf{d}_1) \mathbf{W}_2(\mathbf{d}_2) \dots \mathbf{W}_j(\mathbf{d}_j) \mathbf{W}_{j+1}(\mathbf{d}_{j+1}) \dots \mathbf{W}_q(\mathbf{d}_q) \mathbf{X}_1,$$

где $j = 1, 2, \dots, q$.

Определим [8] ресурсоемкость $R_j(\mathbf{d}_j)$ j -го блока:

$$R_j(\mathbf{d}_j) = |\mathbf{W}_j(\mathbf{d}_j)| = \sqrt{d_{1,j}^2 + d_{2,j}^2 + \dots + d_{k,j}^2} \quad (4)$$

и ресурсоемкость Rq всей цепочки из q штук блоков:

$$Rq = \sum_{j=1}^q R_j(\mathbf{d}_j) = \sum_{j=1}^q |\mathbf{W}_j(\mathbf{d}_j)|. \quad (5)$$

Тогда первая постановка экстремальной задачи окончательно формулируется следующим образом.

Задано конечное множество $\mathbf{F} = \{\mathbf{W}_1(\mathbf{d}_1), \mathbf{W}_2(\mathbf{d}_2), \dots, \mathbf{W}_s(\mathbf{d}_s)\}$ передаточных матриц физических эффектов, элементами которого являются передаточные матрицы вида (3), преобразующие входную величину эффекта в выходную величину, s — число известных существующих эффектов.

Заданы матрицы входной \mathbf{X}_1 и выходной \mathbf{Y}_q величин ИПУ в виде (2). Необходимо найти каждую матрицу $\mathbf{W}_j(\mathbf{d}_j)$ из произведения

$$\prod_{j=1}^q \mathbf{W}_j(\mathbf{d}_j) = \mathbf{Y}_q (\mathbf{X}_1)^{-1}, \quad (6)$$

которая бы принадлежала базе данных физических эффектов $\mathbf{W}_j(\mathbf{d}_j) \in \mathbf{F}$ и которая минимизировала бы общую ресурсоемкость Rq (5).

Во второй постановке задачи вводятся дополнительные к первой постановке численные ограничения, такие как заданные значения входной x_j и выходной y_j величин блоков (или диапазоны их изменения Δx_j и Δy_j). В этом случае матрицы входной и выходной величин (2) расширяются до размера $(k+1) \times (k+1)$

$$X_j = \begin{bmatrix} A_1^{b_{1,j}} & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \ddots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & A_k^{b_{k,j}} & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & x_j \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$Y_j = \begin{bmatrix} A_1^{c_{1,j}} & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \ddots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & A_k^{c_{k,j}} & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & y_j \end{bmatrix},$$

так что физические величины эффекта задаются в матрицах со своей размерностью. Тогда передаточная матрица (3) j -го блока записывается в виде

$$\mathbf{W}_j(\mathbf{d}_j) = \begin{bmatrix} A_1^{b_{1,j}} & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \ddots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & A_k^{b_{k,j}} & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & W_j(s) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где $W_j(s) = \frac{y_j(s)}{x_j(s)}$ — скалярная заданная передаточная функция j -го блока, $j = 1, 2, \dots, q$, $s = d/dt$ — оператор дифференцирования по времени t .

Графический поиск в k -мерном пространстве физических координат

Зададим k -мерную систему координат в базисе

$$\{A_1^1, A_2^1, \dots, A_i^1, A_{i+1}^1, \dots, A_k^1\}, \quad (9)$$

где A_i^1 — орт i -й координаты A_i , которая является основной единицей в рассматриваемой системе размерностей (1). Например, для семи основных единиц системы СИ ($k = 7$) $\{A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7\} = \{\text{метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин, кандела, моль}\}$. В системе координат (9) введем k -мерные векторы X_j входной величины и Y_j выходной величины j -го блока ИПУ:

$$X_j = [b_{1,j}, b_{2,j}, \dots, b_{i,j}, b_{i,j+1}, \dots, b_{k,j}]^T,$$

$$Y_j = [c_{1,j}, c_{2,j}, \dots, c_{i,j}, c_{i,j+1}, \dots, c_{k,j}]^T,$$

где T — операция транспонирования, а коэффициенты $b_{i,j}$ и $c_{i,j}$ определены в соотношениях (1). Тогда вектор

$$Z_j = Y_j - X_j = [d_{1,j}, d_{2,j}, \dots, d_{i,j}, d_{i,j+1}, \dots, d_{k,j}]^T$$

в k -мерной системе координат задает вершину графа j -го физического эффекта, реализуемого в блоке ИПУ с передаточной матрицей $\mathbf{W}_j(\mathbf{d}_j) = \mathbf{Y}_j(\mathbf{X}_j)^{-1}$ (3), а координаты его образуют множество \mathbf{d}_j диагональных элементов матрицы $\mathbf{W}_j(\mathbf{d}_j)$. Вектор $Z_j = \text{diag } \mathbf{W}_j(\mathbf{d}_j)$ назовем собственным вектором преобразования j -го физического эффекта. Он обладает минимальной длиной, определяемой величиной ресурсоемкости $R_j(\mathbf{d}_j)$ (4). Если матрица $\mathbf{W}_j(\mathbf{d}_j) \in \mathbf{F}$, а входная X_j и выходная Y_j величины одновременно являются соответственно входной и выходной величинами всего ИПУ, то задача поиска ФПД решена за один шаг перехода от X_j к Y_j , ИПУ состоит из одного j -го блока.

В противном случае в пространстве k -мерной системы координат необходимо искать кратчайший путь из заданной начальной точки X_1 в заданную конечную точку Y_q , т. е. находить последовательность

$$Z_j: \sum_{j=1}^q |Z_j| = \sum_{j=1}^q R_j(\mathbf{d}_j) = \min.$$

Решение этой задачи в теории графов хорошо известно [11, 12] и сводится к пошаговому поиску минимального пути из заданной вершины ориентированного взвешенного графа с неотрицательными весами ребер в заданную конечную вершину. Поиск оптимального ФПД проще вести для дуальных графов физических эффектов [13], когда входное и выходное ребра графа заменяются вершинами с входной и выходной матрицами \mathbf{X}_j и \mathbf{Y}_j соответственно, а вершина заменяется ребром, вес которого определяется модулем передаточной матрицы $|\mathbf{W}_j(\mathbf{d}_j)| = R_j(\mathbf{d}_j) \geq 0$.

Если заданы ограничения на численные значения входов и выходов графов, а также параметров передаточных функций физических эффектов, то они учитываются на каждом шаге поиска. Если ограничения не выполняются, то на очередном шаге ищется другой физический эффект, для которого ограничения выполняются.

Пример поиска в двумерной системе LT -координат

Двухмерная система кинематических величин Бартини—Кузнецова [10] имеет две основные единицы измерений — длину L и время T . LT -базис как универсальная пространственно-временная система общих законов природы используется для решения проблемы устойчивого развития в структуре природа—общество—человек [14]. В изобретательской практике LT -система применяется для имитационного моделирования ИЭС ИПУ и систем управления [15] в целях оценки избыточности [8] и асимметрии структуры [16]. Из-за наличия двух основных единиц измерений ($k = 2$) в LT -базисе задачи по построению графов можно наглядно решать на плоскости в векторном виде.

Рассмотрим пример измерения давления P , в котором выходной величиной должен быть электрический ток I . Находим передаточную матрицу преобразования

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_{IP} &= \mathbf{IP}^{-1} = \begin{bmatrix} L^3 & 0 \\ 0 & T^{-3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^2 & 0 \\ 0 & T^{-4} \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} L^{d_{1,1}} & 0 \\ 0 & T^{d_{2,1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L^1 & 0 \\ 0 & T^1 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

В системе LT -координат (рис. 1), построенной на таблице Бартини, откладываем собственный вектор преобразования по стрелке \mathbf{I} , идущей из точки "Давление" [L^2T^{-4}] в точку "Ток" [L^3T^{-3}]. Находим ресурсоемкость эффекта преобразования

$$R_1(\mathbf{d}_1) = |\mathbf{W}_{IP}| = \sqrt{1^2 + 1^2} = \sqrt{2} = 1,41,$$

где \mathbf{d}_1 — двумерный вектор, $\mathbf{d}_1 = [d_{1,1} \ d_{2,1}]^T$.

Это преобразование имеет минимальную ресурсоемкость в смысле затрат усилий проектировщика на разработку ФПД прибора, измеряющего давление. С математической точки зрения в случае нахождения дифференциального уравнения связи входной и выходной величин достаточно одного интегратора по времени и одного интегратора по пространственной координате. В базе данных физических эффектов с входом P и выходом I и передаточной матрицей \mathbf{W}_{IP} не найдено, однако обнаружен физический эффект изменения приращений электрического тока ΔI при изменении измеряемого давления P , используемый в ионизационных вакуумметрах [17] и имеющий ту же передаточную матрицу \mathbf{W}_{IP} . Вакуумметр пред-

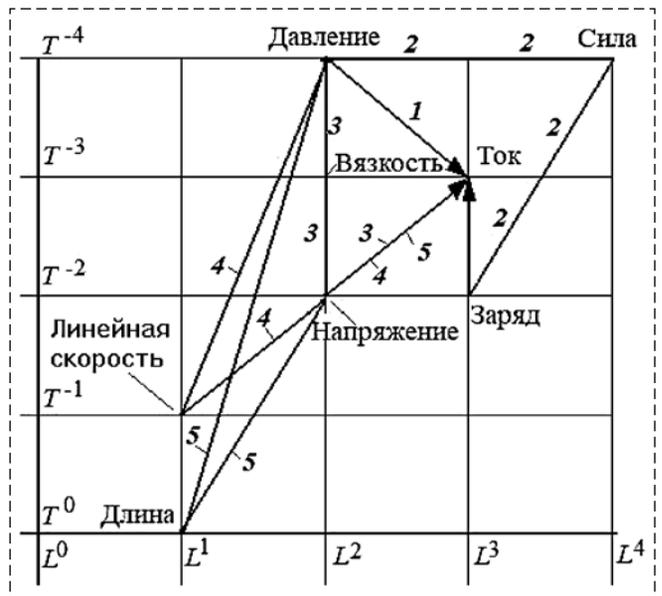


Рис. 1. Геометрический поиск эффектов на LT -плоскости
Fig. 1. Geometric search for effects on the LT -plane

ставляет собой вакуумный диод. При понижении давления газа внутри диода уменьшается число атомов, способных подвергнуться ионизации, и, соответственно, ионизационный ток, текущий между электродами при данном напряжении. Все остальные графы преобразователей давления в электрический ток будут иметь ресурсоемкость больше, чем $\sqrt{2}$.

Прямой пьезоэлектрический эффект [18] входит в граф преобразований Давление \rightarrow Сила \rightarrow Заряд \rightarrow Ток (ломаная линия 2 на рис. 1). Математически цепочка задается произведением трех передаточных матриц

$$\mathbf{W}_{IP} = \begin{bmatrix} L^2 & 0 \\ 0 & T^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^{-1} & 0 \\ 0 & T^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^0 & 0 \\ 0 & T^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L^1 & 0 \\ 0 & T^1 \end{bmatrix}$$

с ресурсоемкостью

$$R_2(\mathbf{d}_2) = \sqrt{2^2 + (0)^2} + \sqrt{(-1)^2 + (2)^2} + \sqrt{(0)^2 + (-1)^2} = 3 + \sqrt{5} = 5,24.$$

Устройство, реализующее эту цепочку, может состоять из конуса или пирамиды, основание которой воспринимает измеряемое давление P , а вершина действует силой F на грань пьезокристалла, к двум противоположным граням которого подключается резистор для пропускания разрядного тока I .

Граф преобразований Давление \rightarrow Вязкость \rightarrow Напряжение \rightarrow Ток (ломаная линия 3 на рис. 1) включает в себя физический эффект Дорна [19]. Эффект заключается в возникновении разности потенциалов между погруженными в жидкость сетчатыми электродами, один из которых размещен у дна сосуда, а другой находится в верхней части. Частицы, взвешенные в жидкости, перемещаются в одном направлении под действием силы тяжести или, как в данном случае, под действием ультразвукового поля. Этот потенциал называется седиментационным или потенциалом оседания, он зависит от свойств частиц и свойств жидкости, в том числе и от вязкости коллоидной фазы, которая изменяется при изменении давления ультразвука. Цепочка также задается произведением трех передаточных матриц от давления P к вязкости Θ , от вязкости к разности потенциалов (электрическому напряжению) U и, далее, к току I :

$$\mathbf{W}_{IP} = \begin{bmatrix} L^0 & 0 \\ 0 & T^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^0 & 0 \\ 0 & T^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^1 & 0 \\ 0 & T^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L^1 & 0 \\ 0 & T^1 \end{bmatrix}$$

с ресурсоемкостью

$$R_3(\mathbf{d}_3) = \sqrt{1^2 + (0)^2} + \sqrt{(0)^2 + (1)^2} + \sqrt{(1)^2 + (-1)^2} = 2 + \sqrt{2} = 3,41.$$

Магнитогидродинамический эффект [20] включен в граф преобразований 4 (рис. 1), т. е. Давление \rightarrow Линейная скорость \rightarrow Напряжение \rightarrow Ток. На этом эффекте работают МГД-генераторы. По сути, в этом эффекте проявляется закон электромагнитной индукции Фарадея — возникновение ЭДС E на концах проводника, движущегося с линейной скоростью V в магнитном поле с индукцией B поперек силовых линий магнитного поля. Замыкание проводника приводит к генерации тока I . Гидравлическая реализация устройства может представлять трубу, по которой протекает электропроводная жидкость со скоростью V под действием разности измеряемых давлений ΔP на входе и выходе трубы, где в жидкости установлены электроды для снятия наводимой ЭДС E . Труба установлена в магнитном поле с индукцией B . Матрица передачи от измеряемого давления к току также представляется в виде произведения трех передаточных матриц

$$\mathbf{W}_{IP} = \begin{bmatrix} L^{-1} & 0 \\ 0 & T^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^1 & 0 \\ 0 & T^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^1 & 0 \\ 0 & T^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L^1 & 0 \\ 0 & T^1 \end{bmatrix}$$

с ресурсоемкостью

$$R_4(\mathbf{d}_4) = \sqrt{(-1)^2 + (3)^2} + \sqrt{(1)^2 + (-1)^2} + \sqrt{(1)^2 + (-1)^2} = \sqrt{10} + 2\sqrt{2} = 5,99.$$

Наконец, рассмотрим широко применяемое при измерении давления устройство с мембраной, которая прогибается под действием давления P и перемещает шток магнитного сердечника индуктивного преобразователя на величину прогиба Z . Прогиб Z измеряется в единицах длины. Выходное напряжение U индуктивного преобразователя усиливается в электронном усилителе по току I , который является выходом датчика давления P . Более подробно конструкция датчика рассмотрена в работе [8]. Граф мембранного преобразователя Давление \rightarrow Длина \rightarrow Напряжение \rightarrow Ток обозначен на рис. 1 цифрой 5:

$$\mathbf{W}_{IP} = \begin{bmatrix} L^{-1} & 0 \\ 0 & T^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^1 & 0 \\ 0 & T^{-2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^1 & 0 \\ 0 & T^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L^1 & 0 \\ 0 & T^1 \end{bmatrix}$$

с ресурсоемкостью

$$R_5(\mathbf{d}_5) = \sqrt{(-1)^2 + (4)^2} + \sqrt{(1)^2 + (-2)^2} + \sqrt{(1)^2 + (-1)^2} = \sqrt{17} + \sqrt{5} + \sqrt{2} = 7,77.$$

Ясно, что возможны и другие цепочки реализации ФПД прибора, включающие другие физические эффекты. Однако решением экстремальной задачи является граф ФПД, имеющий наименьшую ресурсоемкость. Синтез неминимальных цепочек ФПД можно объяснить необходимостью решения изобретательской задачи [21] в целях патентования нового устройства или способа измерения.

Динамическая имитационная модель размерностей физического эффекта

Имитационное моделирование размерностей проводится в целях расчета ресурсоемкости физического эффекта, на который наложены динамические ограничения (8) в виде дифференциального уравнения, связывающего входную и выходную величины эффекта. Особенностью модели является то, что каждая компонента вектора состояний входит в модель со своей размерностью.

Для примера моделирования рассмотрим дифференциальное уравнение инерционной мембраны:

$$\tau sz(t) + z(t) = k_c p(t),$$

где $z(t)$ — динамическая функция изменения прогиба Z мембраны; $p(t)$ — заданная динамическая функция измеряемого давления P ; $s = d/dt$ — оператор дифференцирования; τ — постоянная времени; k_c — статический коэффициент преобразования; t — текущее время. Схему моделирования уравнения представляем в канонической управляемой форме (рис. 2). Схема содержит два усилителя 1 и 2, сумма-

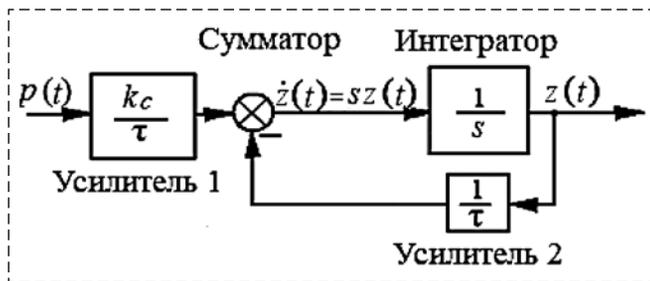


Рис. 2. Схема моделирования мембранного преобразователя давления

Fig. 2. Simulation Diagram of a diaphragm pressure transmitter

тор и интегратор. Необходимо найти их передаточные матрицы для имитационной модели размерностей.

По таблице Бартини находим размерности давления $[P] = [L^2 T^{-4}]$ и прогиба мембраны, измеряемого в единицах длины, $[Z] = [L^1 T^0]$. Записываем размерности на главных диагоналях передаточных матриц \mathbf{P} и \mathbf{Z} :

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} L^2 & 0 & 0 \\ 0 & T^{-4} & 0 \\ 0 & 0 & p(t) \end{bmatrix}, \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} L^1 & 0 & 0 \\ 0 & T^0 & 0 \\ 0 & 0 & z(t) \end{bmatrix},$$

в которых третьими элементами главных диагоналей являются входная $p(t)$ и выходная $z(t)$ величины эффекта соответственно. Далее находим матрицу $\dot{\mathbf{Z}}$, у которой размерность $[\dot{\mathbf{Z}}]$ по таблице Бартини равна $[L^1 T^{-1}]$, а третий элемент главной диагонали в операторной форме равен $sz(t)$:

$$\dot{\mathbf{Z}} = \begin{bmatrix} L^1 & 0 & 0 \\ 0 & T^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & sz(t) \end{bmatrix}.$$

Находим передаточную матрицу интегратора \mathbf{W}_{Int} :

$$\mathbf{W}_{\text{Int}} = \mathbf{Z} \dot{\mathbf{Z}}^{-1} = \begin{bmatrix} L^0 & 0 & 0 \\ 0 & T^1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{s} \end{bmatrix}.$$

Размерности выходных величин усилителей должны быть одинаковыми и совпадать с размерностью величины $[\dot{\mathbf{Z}}] = [L^1 T^{-1}]$, так как на сумматоре Sum могут алгебраически суммироваться только физические величины одной размерности, и величина на выходе сумматора должна иметь ту же самую размерность. Запишем уравнение для выходной величины усилителя 1:

$$\mathbf{P} \mathbf{W}_{\text{G1}} = \begin{bmatrix} L^2 & 0 & 0 \\ 0 & T^{-4} & 0 \\ 0 & 0 & p(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^m & 0 & 0 \\ 0 & T^n & 0 \\ 0 & 0 & \frac{k_c}{\tau} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L^1 & 0 & 0 \\ 0 & T^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{p(t)k_c}{\tau} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где m и n — неизвестные показатели степеней при L и T в матрице \mathbf{W}_{G1} , а $\frac{k_c}{\tau}$ — статический коэффициент передачи безинерционного усилителя 1. Из условия равенства левой и правой частей уравнения (10) находим m и n , записываем матрицу

$$\mathbf{W}_{G1} = \begin{bmatrix} L^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & T^3 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{k_c}{\tau} \end{bmatrix}.$$

Аналогично для выходной величины усилителя 2 получаем:

$$\mathbf{Z}\mathbf{W}_{G2} = \begin{bmatrix} L^1 & 0 & 0 \\ 0 & T^0 & 0 \\ 0 & 0 & z(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^r & 0 & 0 \\ 0 & T^u & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\tau} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L^1 & 0 & 0 \\ 0 & T^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{z(t)}{\tau} \end{bmatrix},$$

откуда $r = 0$, $u = -1$. Тогда передаточная матрица \mathbf{W}_{G2} второго усилителя будет равна

$$\mathbf{W}_{G2} = \begin{bmatrix} L^0 & 0 & 0 \\ 0 & T^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\tau} \end{bmatrix}.$$

Так как сумматор имеет два входа, то для его имитационной модели введем две передаточные матрицы \mathbf{W}_{S1} и \mathbf{W}_{S2} по первому и второму входам соответственно:

$$\mathbf{W}_{S1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{W}_{S2} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}.$$

Для проверки правильности выбора матриц \mathbf{W}_{S1} и \mathbf{W}_{S2} подставляем их в уравнение сумматора $\mathbf{P}\mathbf{W}_{G1}\mathbf{W}_{S1} - \mathbf{Z}\mathbf{W}_{G2}\mathbf{W}_{S2} = \dot{\mathbf{Z}}$, в котором выполняем сначала умножение матриц, а затем алгебраическое суммирование. Получаем тождество:

$$\begin{bmatrix} L^1 & 0 & 0 \\ 0 & T^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{p(t)k_c}{\tau} - \frac{z(t)}{\tau} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} L^1 & 0 & 0 \\ 0 & T^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & sz(t) \end{bmatrix}.$$

Схема имитационной модели размерностей приведена на рис. 3.

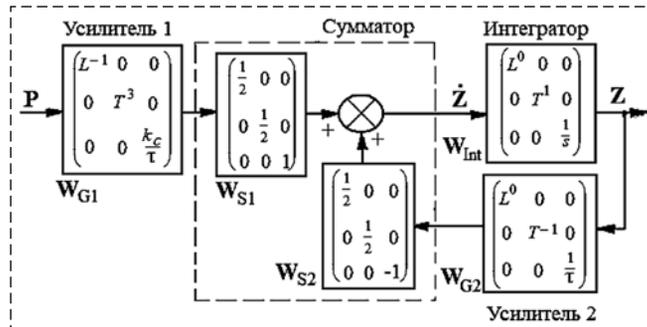


Рис. 3. Схема имитационного моделирования размерностей
Fig. 3. Simulation scheme of dimensions

Для общего случая суммирования n входов справедливо условие: если первые два элемента на главной диагонали матриц \mathbf{W}_{S1} и \mathbf{W}_{S2} будут равны $1/n$, тогда размерность выходной величины сумматора будет равна размерности входных величин.

Ресурсоемкость динамической модели мембранного преобразователя равна $\sqrt{10} + 2 = 5,16$, для статической модели $\sqrt{17} = 4,12$.

Если в качестве динамической модели преобразователя выбрать звено второго порядка, например, колебательное, то в модели размерностей появится второй интегратор и второй усилитель в обратной связи. В этом случае можно учесть численные ограничения физического эффекта на собственную частоту колебаний и коэффициент демпфирования. Ресурсоемкость для преобразователя со звеном второго порядка равна $\sqrt{5} + 4 = 6,24$.

Заключение

В статье предложен алгоритм оптимального синтеза информационно-энергетических схем измерительно-преобразовательных устройств. В результате синтеза последовательности физических эффектов, преобразующих заданную входную величину в заданную выходную величину, строится ориентированный граф, обладающий минимальным путем. Главным отличием является математическая формализация графа, вершины и ребра которого являются квадратными k -мерными матрицами размерностей физических величин, где k — число основных единиц системы физических величин, например, СИ. Благодаря этому появляется возможность количественно сравнивать структурные схемы как измерительно-преобразовательных устройств, так и систем управления, по степени ресурсоемкости. Ресурсо-

емкость структуры определяется суммой норм матриц вершин графа, либо, в силу дуальности, суммой норм матриц ребер.

Для учета динамических свойств физических эффектов в экстремальной задаче вводятся ограничения в виде дифференциальных уравнений связи входной и выходной величин физического эффекта. Ограничения вводятся в гибридную схему имитационного моделирования дифференциального уравнения вместе с размерностями переменных состояния путем расширения матриц как вершин, так и ребер графа.

Приведен пример расчета ресурсоемкости такой гибридной схемы для физического эффекта преобразования входного давления в прогиб мембраны.

Список литературы

1. Зарипов М. Ф., Петрова И. Ю. Энергоинформационный метод анализа и синтеза чувствительных элементов систем управления // Датчики и системы. 1999. № 5. С. 10–17.
2. Yakovlev A. A., Sorokin V. S., Postupaeva S. G. Modeling Physical Operating Principles During Search Design of Cooling and Refrigerating Systems // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). 2019. P. 511–520.
3. Yakovlev A. A., Sorokin V. S., Mishustina S. N., Proidakova N. V., Postupaeva S. G. A new method of search design of refrigerating systems containing a liquid and gaseous working medium based on the graph model of the physical operating principle // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 803. 2017.
4. Fomenkov S. A., Korobkin D. M., Kolesnikov S. G., Kamayev V. A., Kravets A. G. The Automated Methods of Search of Physical Effects // Journal of Soft Computing. 2015. Vol. 10, N. 3. P. 234–238.
5. Korobkin D. M., Fomenkov S. A., Kolesnikov S. G., Lobeyko V. I. Synthesis of new technical solutions with physical effects database // 7th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications IISA 2016. P. 7785397.
6. Korobkin D. M., Fomenkov S. A., Kolesnikov S. G., Golovanchikov A. B. Computer-aided design of the new technical systems based on the physical effects database // 8th International Conference on Information, Intelligence, Systems & Applications (IISA). Larnaca, 2017. P. 1–6.
7. Coatanéab E., Ryyänänen L., Caloniusb O., Mokammelb Fa., Riitahuhtab A. Systematic search and ranking of physical con-

traditions using graph theory principles: Toward a systematic analysis of design strategies and their impacts // World Conference: TRIZ FUTURE, TF 2011–2014. Procedia Engineering 131. 2015. P. 1165–1182.

8. Бушуев А. Б. Численная оценка информационно-энергетических схем измерительных устройств // Измерительная техника. 2017. № 9. С. 3–7.

9. Бушуев А. Б., Тюрин А. И. Информационно-энергетические схемы в изобретательской практике // XIV конференция Саммита разработчиков ТРИЗ "ТРИЗ в развитии" Сборник научно-исследовательских трудов. Библиотека Саммита разработчиков ТРИЗ. СПб, 2018. Вып. № 10. С. 118–134.

10. Баргини Р. О., Кузнецов П. Г. О множественности геометрий и множественности физик / Проблемы и особенности современной научной методологии. Свердловск: АН СССР, Урал. науч. центр, 1978. С. 55–65.

11. Евстигнеев В. А. Применение теории графов в программировании / Под ред. А. П. Ершова. М.: Наука, 1985. 352 с.

12. Cherkassky V. V., Goldberg A. V., Radzik T. Shortest paths algorithms: Theory and experimental evaluation // Math. Prog. Springer-Verlag, 1996. Vol. 73, Iss. 2. P. 129–174.

13. Bushuev A. B., Kudriavtseva V. A. Simulation of the block diagrams of the information energy converters // Proc. of the Intern. Conf. on Innovative Applied Energy (IAPE'19), Oxford, UK. 2019. N. 272. P. 40.

14. Большаков Б. Е., Кузнецов О. Л. Научные основы проектирования устойчивого развития в системе природа — общество — человек. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. Факультет технической кибернетики. Учебное издание. СПб., 2012. 678 с.

15. Бушуев А. Б., Петров В. А. Имитационное моделирование систем управления в *LT*-базисе // Восьмая Всероссийская научно-практическая конференция "Имитационное моделирование. Теория и практика" (ИММОД-2017). Труды конференции. Секция 1. СПб, 2017. С. 88–93.

16. Бушуев А. Б., Бажин В. Ю., Литвинов Ю. В., Петров В. А., Мансурова О. К. Биологическая модель поиска решения изобретательской задачи // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 9. С. 851–859.

17. Pacey D. J. Chapter 15 — Measurement of Vacuum. Instrumentation Reference Book (Fourth Edition). Elsevier: 2010. P. 165–173.

18. Бобцов А. А., Быстров С. В., Бойков В. И., Григорьев В. В., Карев П. В. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений. Университет ИТМО, 2017. 134 с.

19. Dukhin A. S., Goetz P. J. Characterization of liquids, nano — and micro- particulates and porous bodies using Ultrasound. Elsevier, 2017.

20. Egorov E., Agafonov V., Avdyukhina S., Borisov S. Angular Molecular—Electronic Sensor with Negative Magnetohydrodynamic Feedback // Sensors. 2018. 10 p.

21. Альтшуллер Г. С. Найти идею. Введение в теорию решения изобретательских задач. Петрозаводск: Скандинавия, 2004. 208 с.

Synthesis of Optimal Information and Energy Schemes of Measuring and Converting Devices

A. B. Bushuev, bushuev@inbox.ru, V. I. Boikov, e-mail: viboikov@mail.ru,
S. V. Bystrov, sbystrov@mail.ru, V. V. Grigoriev, grigvv@yandex.ru,
ITMO National Research University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation,
O. K. Mansurova, erke7@mail.ru,
Saint-Petersburg, 199106, Russian Federation

Corresponding author: Bushuev A. B., Ph. D., Senior Lecturer, ITMO National Research University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, e-mail: bushuev@inbox.ru

Accepted on April 21, 2021

Abstract

The synthesis of information and energy schemes is posed as an extreme problem, the purpose of which is a weighted directed graph of the minimum length from the input value to the output value of the device. The nodes of the graph are the physical effects included in the given database, and the branches are the input and output values of the effects. Nodes and branches are mathematically defined by diagonal multidimensional matrices, whose elements are determined by the dimensions of the quantities in the selected system of physical coordinates with a given number of basic units of measurement. The weight or resource intensity of the graph elements is determined by the norm of the corresponding matrices. The resulting circuit is suitable for use in technical documentation to explain the operating principle of the device, as well as for patent protection.

In the enhanced formulation of the extreme problem, restrictions are introduced on the numerical values of the input and output values of the effect and its dynamic properties in the form of the transfer function of the effect. In this case, the size of the transfer matrices of nodes and branches is expanded by one. As a result, the transfer matrix of the effect contains information not only about the dynamic properties of the effect, but also about the dimensions of the physical quantities at its input and output.

In a detailed example, the case of searching for the operating principle of a measuring-converting device of a pressure sensor with an electric current output is considered. To simplify the geometric representation of graph vectors on a plane, the problem is considered for a two-dimensional system of physical quantities with basic units of length and time. The calculation of the resource capacity is carried out according to the scheme of dimensional simulation, in which the phase variables of the differential equation enter with their physical dimensions. According to the numerical value of the resource capacity, you can compare different versions of the implementation of the operating physical principle of the device.

Keywords: information and energy schemes, graph of the physical operating principle, transfer matrix of the physical effect, simulation of dimensions

For citation:

Bushuev A. B., Boikov V. I., Bystrov S. V., Grigoriev V. V., Mansurova O. K. Synthesis of Optimal Information and Energy Schemes of Measuring and Converting Devices, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 10, pp. 518–526.

DOI: 10.17587/mau.22.518-526

References

1. **Zaripov M. F., Petrova I. Yu.** Energy-informational method of analysis and synthesis of sensitive elements of control systems, *Datch. Sistemy*, 1999, no. 5, pp. 10–17 (in Russian).
2. **Yakovlev A. A., Sorokin V. S., Postupaeva S. G.** Modeling Physical Operating Principles During Search Design of Cooling and Refrigerating Systems, *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019)*, 2019, pp. 511–520.
3. **Yakovlev A. A., Sorokin V. S., Mishustina S. N., Proidakova N. V., Postupaeva S. G.** A new method of search design of refrigerating systems containing a liquid and gaseous working medium based on the graph model of the physical operating principle, *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 803, 2017, 012181.
4. **Fomenkov S. A., Korobkin D. M., Kolesnikov S. G., Kamaev V. A., Kravets A. G.** The Automated Methods of Search of Physical Effects, *Journal of Soft Computing* 10(3):234–238, 2015.
5. **Korobkin D. M., Fomenkov S. A., Kolesnikov S. G., Lobeyko V. I.** Synthesis of new technical solutions with physical effects database, *7th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications*, IISA 2016, pp. 7785397.
6. **Korobkin D. M., Fomenkov S. A., Kolesnikov S. G., Golovanchikov A. B.** Computer-aided design of the new technical systems based on the physical effects database, *8th International Conference on Information, Intelligence, Systems & Applications (IISA)*, Larnaca, 2017, pp. 1–6.
7. **Coatanéab E., Rynänen L., Calonius O., Mokammel Fa, Riitahuhtab A.** Systematic search and ranking of physical contradictions using graph theory principles: Toward a systematic analysis of design strategies and their impacts, *World Conference: TRIZ FUTURE, TF 2011-2014*, *Procedia Engineering* 131, 2015, pp. 1165–1182.
8. **Bushuev A. B.** Numerical Estimation of the Energy Information Circuits of Measurement Devices, *Measurement Techniques*, December, 2017, vol.60, no. 9, pp. 857–862.
9. **Bushuev A. B., Turin A. I.** The Energy Information Circuits in Inventive Practice, *Development of Tools for the Solution of Innovation Problems: Coll. Sci. Studies*, Library of TRIZ Developers Summit, 2018, pp. 1–15 (in Russian).
10. **Bartini R. O., Kuznetsov P. G.** On the multiplicity of geometries and the multiplicities of physical sciences, *Problems and Features of Modern Scientific Methodology*, Ural Scientific Center of the USSR Academy of Sciences. Sverdlovsk, 1978, pp. 55–65 (in Russian).
11. **Evstigneev V. A.** Application of graph theory in programming, Edited by A. P. Yershov, Moscow, Nauka, 1985, 352 p. (in Russian).
12. **Cherkassky B. V., Goldberg A. V., Radzik T.** Shortest paths algorithms: Theory and experimental evaluation, *Math. Prog.* Springer-Verlag, 1996, vol. 73, iss. 2, pp. 129–174.
13. **Bushuev A. B., Kudriavtseva V. A.** Simulation of the block diagrams of the information energy converters, *Proc. of the Intern. Conf. on Innovative Applied Energy (IAPE'19)*, Oxford, UK, 2019, no. 272, pp. 40.
14. **Bolshakov B. E., Kuznetsov O. L.** Scientific bases of designing sustainable development in the system nature-society-man, St. Petersburg, 2012, 678 p. (in Russian).
15. **Bushuev A. B., Petrov V. A.** Simulation modeling of control systems in LT-basis, *Eighth All-Russian Scientific and Practical Conference "Simulation modeling. Theory and Practice" (IMMOD-2017). Proceedings of the conference*. Section 1, St. Petersburg, 2017, pp. 88–93 (in Russian).
16. **Bushuev A. B., Bazhin V. Yu., Litvinov Yu. V., Petrov V. A., Mansurova O. K.** Biological model for finding solutions to an inventive problem, *Journal of Instrument Engineering*, 2019, vol. 62, no. 9, pp. 851–859 (in Russian).
17. **Pacey D. J.** Chapter 15 Measurement of Vacuum. Instrumentation Reference Book (Fourth Edition), Elsevier, 2010, pp. 165–173.
18. **Bobtsov A. A., Bystrov S. V., Boikov V. I., Grigoriev V. V., Karev P. V.** Executive devices and systems for microdisplacement — ITMO University, 2017, 134 p. (in Russian).
19. **Dukhin A. S., Goetz P. J.** Characterization of liquids, nano and micro-particulates and porous bodies using Ultrasound, Elsevier, 2017.
20. **Egorov E., Agafonov V., Avdyukhina S., Borisov S.** (2018). Angular Molecular—Electronic Sensor with Negative Magnetohydrodynamic Feedback, *Sensors*.
20. **Althuller G. S.** Finding Ideas. Introduction to the Theory of Inventive Problem Solving, Petrozavodsk, Skandinaviya, 2004, 208 p. (in Russian).