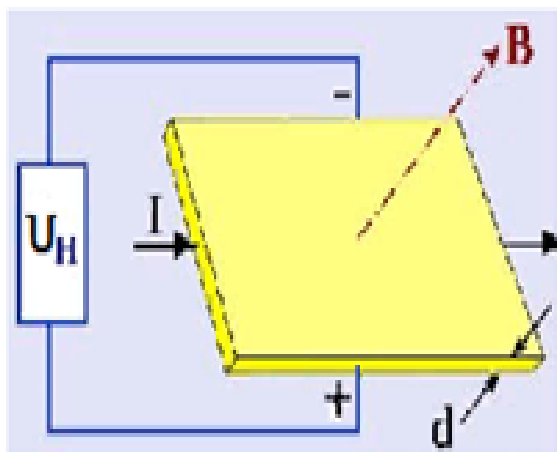


А.Б. Бушуев

**ФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ
В ИЗОБРЕТАТЕЛЬСКИХ ЗАДАЧАХ**



Санкт-Петербург
2022

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

А.Б. Бушуев

ФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ИЗОБРЕТАТЕЛЬСКИХ ЗАДАЧАХ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлениям подготовки 13.04.02, 15.03.06, 15.04.06, 24.04.02,
27.03.04, 27.04.04

в качестве учебно-методического пособия для реализации
образовательных программ высшего образования бакалавриата, магистратуры,

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург
2022

Бушуев А.Б. Физические эффекты в изобретательских задачах— СПб: Университет ИТМО, 2022. – 46 с.

Рецензенты:

Быстров Сергей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент (квалификационная категория "ординарный доцент") факультета систем управления и робототехники, Университета ИТМО.

Учебно-методическое пособие предназначено для изучения теории физических эффектов, используемых при решении изобретательских задач, включает в себя сведения по классификации и указателям физических эффектов, по передаточным матрицам эффектов в ЛТ-базисе Бартини, по построению трендов физических эффектов, и может быть использовано для выполнения первого и второго домашних заданий по курсам «Основы научно-технического творчества» для бакалавриата и «Теории решения изобретательских задач» для магистратуры.



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5–100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2022

© Бушуев А.Б. 2022

Оглавление

Введение.....	4
1. Указатели физических эффектов.....	7
2. Физические эффекты и вепольный анализ.....	10
2.1. Вопросы для самоконтроля по 1 и 2 главам	11
3. Передаточные матрицы физических эффектов.....	12
4. Пространственные, временные и вещественно-полевые ресурсы в LT-базисе Бартини.....	15
4.1. Вопросы для самоконтроля по 3 и 4 главам	18
5. Физические эффекты в системе Бартини.....	19
6. Поиск физических величин и их размерностей в таблице Бартини.....	24
6.1. Вопросы и задания для самоконтроля по 5 и 6 главам	30
7. Тренды эффектов в LT-базисе.....	32
7.1. Пример нахождения эффектов индуктивного тренда.....	32
7.2. Пример нахождения эффектов тренда проводимости.....	36
7.3. Тренды инвариантов.....	37
7.4. Анализ тренда эволюции мембраны.....	39
7.5. Вопросы и задания для самоконтроля по главе 7.....	43
Литература.....	44

Введение

Физические эффекты относятся к информационному фонду теории решения изобретательских задач (ТРИЗ) и обычно используются для решения так называемых стандартных задач. Задача становится стандартной, если изобретательская ситуация (словесное описание исходной ситуации с возможными рисунками и нежелательным эффектом) прошла предварительную обработку какими-либо методами ТРИЗ, например, вепольным анализом или алгоритмом решения изобретательских задач (АРИЗ). В результате предварительной обработки получается модель задачи в виде веполя, физического противоречия, идеального конечного результата и т.п., к которой и применяется тот или иной физический эффект для нахождения решения.

Разделы изобретательской физики, входящие в различные учебники ТРИЗ, построены одинаково, они основываются на частных примерах использования физического эффекта для решения той или иной задачи. Выбирается случайным образом из школьной физики эффект преобразования одного вида энергии в другой и далее рассматривается его применение в описании известного патента на изобретение. Общая теория физических эффектов в изобретательстве пока еще не сложилась. Неясно, собственно, что должно входить в эту теорию.

Поэтому целью данного учебно-методического пособия является попытка создания теории физических эффектов, используемых в техническом творчестве, а также знакомство студентов с методиками их использования в изобретательских задачах.

В первой главе пособия рассматриваются вопросы классификации физических эффектов, представленных в различных указателях, и приводятся ссылки на соответствующую литературу. Структура указателей несущественно изменилась с момента появления таких указателей (примерно 60 лет назад) в теории решения изобретательских задач. Указатели обычно состоят из двух частей: таблицы или матрицы с названиями физических эффектов и приложения с кратким описанием эффектов и примерами использования в изобретательских задачах.

Во второй главе рассматриваются структурные модели эффектов и связь их с вепольным анализом. Связь рассматривается на уровне полей, используемых в ТРИЗ – механических, термических, химических, электрических магнитных. Установлено, что структура эффекта практически совпадает со структурой веполя в задачах на обнаружение неизвестного поля или вещества.

Первая и вторая главы содержат общий материал как для магистров по курсу «Теория решения изобретательских задач» для выполнения первого домашнего задания, так и для бакалавров – для выполнения первой части домашнего задания по курсу «Основы научно-технического творчества». Физические эффекты используются в трех общих разделах домашних заданий – по использованию законов развития технических систем, по решению

изобретательской задачи с помощью АРИЗ (алгоритма решения изобретательских задач) и в вепольном анализе. Для синтеза новых решений по законам полноты частей системы и повышения информационно-энергетической проводимости показано, как искать необходимый физический эффект и вставить его в структурную модель технической системы. В решении задачи по АРИЗ физические эффекты применяются для разрешения физических противоречий в фазовых переходах первого и второго рода, например, потеря магнитных свойств материала при определенной температуре (точка Кюри). Для вепольного анализа используется структурная модель физического эффекта, отражающая взаимное преобразование механических, термических, электрических и магнитных полей. Например, в эффекте Джоуля электрическое поле преобразуется в тепловое с помощью некоторого вещества – металлического проводника с электрической проводимостью. В пьезоэффекте механическое поле давления преобразуется в электрическое поле с помощью некоторого вещества – пьезокристалла кварца. Структура, состоящая из двух полей и одного вещества получается одинаковой. Таким образом, методика использования физических эффектов заключается в построении их структурной схемы и последующие преобразования по правилам вепольного анализа, например, построение цепных веполей для синтеза физического принципа действия устройства. На этой стадии уже возможно получать патентнопригодные решения.

Остальные главы пособия предназначены для магистров, в частности, для выполнения второго домашнего задания по курсу ТРИЗ, в котором математический аппарат ТРИЗ применяется для структурных схем технических систем и изобретательской работы с ними. Методика работы с физическими эффектами на этой стадии заключается в переходе от структур вепольного анализа к численному, матричному описанию физических эффектов и последующей численной оценке затрат ресурсов времени и пространства на реализацию физического принципа действия прибора.

В третьей главе введена математическая модель физического эффекта в виде его передаточной матрицы. Эффект рассматривается уже не на уровне полей, а на более низком уровне – физических величин, в которых измеряется поле на входе и выходе эффекта. Для получения передаточной матрицы используется теория размерностей, в которой физические величины задаются их размерностями в системе измерения физических величин, например, в международной системе СИ.

В четвертой главе рассмотрены понятия трендов физических величин в двухмерной системе измерений Бартини с основными единицами – длина (L) и время (T). Установлена связь трендов с понятиями оперативной зоны, оперативного времени и вещественно-полевых ресурсов в алгоритме решения изобретательских задач.

В пятой главе приведены примеры вычисления передаточных матриц физических эффектов в LT-базисе Бартини и схемы моделирования размерностей для выполнения второго домашнего задания по курсу ТРИЗ.

В шестой главе рассматривается система кинематических величин, заданная LT-таблицей Бартини. Даны рекомендации, как находить размерности физических величин, которые отсутствуют в таблице, а также особенности использования LT-таблицы в случае измерений в системе СИ. Глава будет полезна для решения задачи по поиску свойств X-элемента на родительском тренде системы Бартини, а также в имитационном моделировании размерностей информационно-энергетических схем во втором домашнем задании по ТРИЗ.

В седьмой главе рассмотрены вопросы построения трендов эффектов в LT-базисе. Тренды позволяют выявить скрытое единство эффектов разной физической природы и используются в разделе законов развития технических систем при выполнении первого домашнего задания по курсу ТРИЗ.

1. Указатели физических эффектов

Под физическим эффектом понимается процесс, действие по преобразованию входной физической величины в выходную физическую величину. Например, эффект электромагнитной индукции заключается в возникновении ЭДС на контактах катушки при движении её в магнитном поле, т.е. по закону Фарадея механическое перемещение преобразуется в электрическую величину. В эффекте Джоуля электрический ток преобразуется в теплоту, В техническом творчестве физические эффекты используются в патентах на изобретения и полезные модели. Поэтому при становлении теории решения изобретательских задач (ТРИЗ) [1] началась работа по классификации физических эффектов, встраиванию их в ТРИЗ. Сейчас физические эффекты наряду с другими эффектами (химическими, геометрическими, биологическими и др.) входят в информационную базу ТРИЗ, в компьютерные программы для решения изобретательских задач.

Первыми работами были указатели физических эффектов [2,3]. В таких указателях все эффекты распределяются по разделам физики - механики, теплоты, электричества, магнетизма, оптики и др. Обычно это распределение оформляется в виде таблиц (рис.1.1). Эффекты в таблице нумеруются порядковыми номерами. На рис. 1.1. приведен фрагмент такой таблицы выбора физических эффектов. Таблица составлена в 1979 г. в Горьковском народном университете научно-технического творчества.

В приложении к таблице приводятся сведения об эффекте - краткое описание физического принципа действия и примеры технических устройств, в которых используется этот эффект. В [3] в качестве примеров использованы формулы изобретений патентов. В указателе [4] эффекты подразделяются по наименованиям входов и выходов, например, вход – сила, выход - сила и перемещение, или вход – силовое поле, выход – электрическое поле.

Следующим этапом классификации является организация базы данных физических эффектов по выполняемым функциям. Поиск эффектов выполняется в базе данных модуля эффектов компьютерной программы Techoptimizer [5]. Входными данными в базу данных являются понятия из вепольного анализа: вещество или поле, а также функция, выполняемая над веществом или полем. Выходными данными являются названия физических эффектов и примеры их применения в патентах. Например, первый вход – вещество, а второй вход – функция перемещения, затем выходы модуля – 39 примеров и эффектов. Такая классификация облегчает изобретателю поиск эффекта.

Еще один способ организации поиска использован в матрице физических эффектов [6]. В способе используются условные обозначения для наименования входных и выходных величин физических эффектов. Фрагмент матрицы представлен на рис.1.2.

Столбцы матрицы являются входами физических величин, а строки – выходами. В матрице приняты следующие обозначения: E – электрическое напряжение, I – электрический ток, Q – количество тепла, T – температура, ρ – удельное сопротивление проводника, F – сила, X – перемещение, H – напряженность магнитного поля.

Выполняемая функция \ Виды энергии	Изменение температуры	Управление перемещением	Управление потоком аэрозолей	Индикация электрических полей
Движение	4,32,39, 67	1,4,20,34,38, 62,72,76	1,4,72,62, 76,98	35,62
Силовое воздействие	106	1	1,66	106,120
Колебания	51	48,49	49,51	-
Тепловая энергия	31,101	16,93	31,66	84,85,120,125

Рис. 1.1. Пример таблицы выбора физических эффектов

		Вход							
		E	I	Q	T	ρ	F	X	H
Выход	E		L_{IE}					L_{XE}	
	I	L_{EI}			L_{TI}				
	Q	L_{EQ}	L_{IQ}		L_{TQ}	$L_{\rho Q}$			
	T	L_{ET}	L_{IT}						
	ρ	$L_{E\rho}$			$L_{T\rho}$		$L_{F\rho}$	$L_{X\rho}$	$L_{H\rho}$
	F	L_{EF}	L_{IF}						
	X	L_{EX}			L_{TX}		L_{FX}		L_{HX}
	H	L_{EH}	L_{IH}				L_{FH}	L_{XH}	

Рис. 1.2. Фрагмент матрицы физических эффектов

Кроме того, полная матрица дополнительно содержит следующие значения: M – крутящий момент, μ – магнитная проницаемость материала, j – плотность тока при термоэлектронной эмиссии, ω – высокочастотные колебания электрического тока, ΔT – разность температур, Π – тепловой поток, E – ЭДС, q –

электрический заряд, Φ – магнитный поток, Σ – модуль упругости металлов, σ – предел прочности и пластичности металлов, Θ – плотность металлов, N – положение элемента в периодической таблице Менделеева, ν – коэффициент Пуассона. Если на пересечении столбца с величиной A и строки с величиной B стоит оператор LAB , то существует физический эффект преобразования величины A в величину B . Например, оператор LEI означает закон Ома $I=E/R$, где R –электрическое сопротивление. Если клетка пересечения пустая, то соответствующий физический эффект пока не известен.

Оператор LAB может иметь три показателя, например, LNT является оператором эффекта Нернста (возникновение продольного градиента температуры в проводнике с током в магнитном поле).

Если для данного входного сигнала в матрице не задан выход, используется комбинация эффектов. Например, пусть необходимо преобразовать входное значение F (сила) в Q (количество тепла). Оператор LFQ отсутствует (красная стрелка на рис. 1.1). Тогда мы преобразуем вход в выход с помощью двух эффектов $F \rightarrow LFr \rightarrow LpQ \rightarrow Q$ (по зеленой стрелке). Оператор LFr задает тензорезистивный эффект $LFr=r_0(aF/S+bF^2/S^2)$, где a и b – константы, зависящие от материала проводника, F/S – давление на проводник площадью S , а r_0 – начальное удельное сопротивление. Оператор LpQ устанавливает закон Джоуля-Ленца, в котором количество тепла Q пропорционально электрическому сопротивлению R проводника, а электрическое сопротивление пропорционально удельному сопротивлению ρ проводника.

В [6] приводится важное дополнение о том, что матрицу эффектов можно расширить до размера 200 на 200. Однако такая матрица будет иметь избыточность, так как свойства объектов определяются гораздо меньшим количеством физических величин. Поэтому необходимо искать методы сжатия информации. Примером может служить периодическая таблица элементов Менделеева в химии. Решение проблемы состоит в том, чтобы найти инвариант, т. е. общее свойство физических эффектов, позволяющее объединить их в один класс.

2. Физические эффекты и вепольный анализ

Как известно, вепольный анализ [1] относится к структурным методам ТРИЗ. Поля, входящие в вепольный анализ, запоминаются по аббревиатуре МАТХЭМ – механические, акустические, термические, химические, электрические и магнитные поля. Эти поля используются в информационном фонде физических эффектов. Кроме того, в информационный фонд ТРИЗ входят математические, в частности, геометрические эффекты, а также, сравнительно недавно введенные в ТРИЗ, биологические эффекты. В [7] все эффекты структурно объединены понятием технологический эффект (рис. 2.1.б).

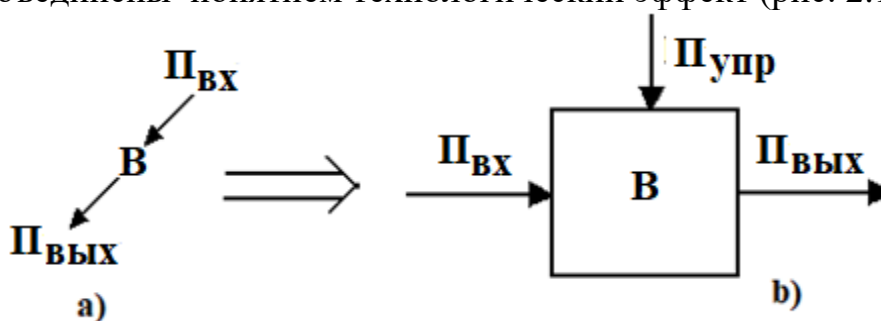


Рис. 2.1. Структурная связь а) веполя и б) технологического эффекта

Для сравнения на рис. 2.1.а приведен веполь для изобретательских задач на обнаружение веществ и полей. В этой структуре неизвестными могут являться входное поле $\Pi_{вх}$ или вещество В, которое преобразует $\Pi_{вх}$ в выходное поле $\Pi_{вых}$, которое воспринимается нашими органами чувств или измерительными приборами. Как видим, структурная схема технологического эффекта почти совпадает со схемой веполя, добавлено только ещё одно поле на входе, названное управляющим $\Pi_{упр}$. Вещество В называется «носителем технологического эффекта, которым могут быть: физические объекты, химические вещества и биологические объекты» [7].

Отметим, что если физические эффекты структурно совпадают с веполями, то для химических и биологических эффектов это не так, и структура на рис.2.1. б для них не годится. Физические эффекты и веполи отражают преобразование одного вида энергии в другой вид. Например, механическая энергия поля давления в пьезоэффекте преобразуется в электрическую энергию зарядов, возникающих на гранях пьезокристалла. В химических эффектах веществом В является не только носитель, но и входные, и выходные величины. Химический эффект описывает некоторую химическую реакцию, в которой происходит соединение или распад веществ. В [7] приводится пример использования химического эффекта для заделки микротрещин в металлических трубах. На внешнюю поверхность трубы наносят раствор соли металла, а внутри трубы пропускают газ аммиак. Газ просачивается сквозь трещину и соединяется с раствором соли, происходит химическая реакция, в результате которой

образуется твердое соединение. В рамках вепольного анализа структура такого эффекта состоит только из веществ (рис. 2.2а), где $V_{вх}$ – газ аммиак, V – соль металла, $V_{вых}$ – твердое соединение, образующееся в трещине.

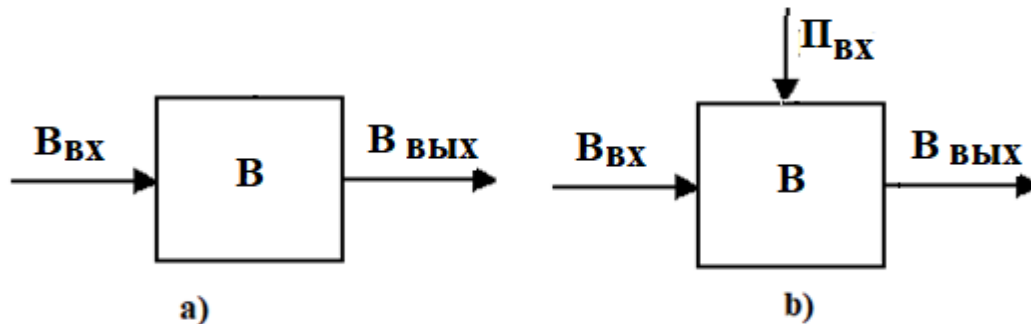


Рис. 2.2. Вепольные схемы химических эффектов

На вход эффекта также может действовать поле $П_{вх}$, например, термическое (рис.2.2b) для ускорения химической реакции. Можно его считать управляющим полем $П_{упр}$. В общем случае на вход может поступать несколько веществ, участвующих в реакции, и несколько веществ появляться на выходе. Результатом реакции может быть также одно или несколько выходных полей, например, механическое поле давления взрыва от соединения двух входных химических веществ. Эффекты можно найти в указателе химических эффектов, составленном Ю.П. Саламатовым и приведенном в сборнике [8].

2.1. Вопросы для самоконтроля по 1 и 2 главам

1. Что такое физический эффект?
2. Что такое указатель физических эффектов и как его найти?
3. Как классифицируются физические эффекты?
4. Что такое вход и выход физического эффекта?
5. Что такое эффект Фарадея и что является для него входом и выходом?
6. Что такое ультразвуковой капиллярный эффект и что является для него входом и выходом?
7. Что такое эффект Барнетта и что является для него входом и выходом?
8. Что такое эффект Холла и что является для него входом и выходом?
9. Что такое технологический эффект?
10. Что такое геометрический эффект?
11. Является ли рычаг физическим эффектом? Если является, то что такое вход и выход рычага?
12. Какие физические эффекты используются в электрической лампочке? Построить их вепольную структуру.

3. Передаточные матрицы физических эффектов

Технологические эффекты, наряду с приемами разрешения типовых физических противоречий и стандартами на решение изобретательских задач, входят в информационный фонд ТРИЗ, или, как теперь называют, базу данных. Следовательно, они несут некоторую информацию. Поставим задачу – найти эту информацию и выразить её некоторыми численными характеристиками.

Будем рассматривать физический эффект (рис. 2.1b) как «черный ящик», т.е. как объект с неизвестной внутренней структурой, для которого известны только входная x и выходная y физические величины. Например, для прямого пьезоэффекта входной величиной является сила F , действующая на пьезокристалл, а выходной величиной – электрический заряд Q , возникающий на гранях кристалла. Величины силы и заряда считаются неизвестными, как и в вепольном анализе, где известно только то, что механическое поле давления преобразуется в электрическое поле заряда. Таким образом, информацией об эффекте являются понятия силы или давления и электрического заряда. Они отличаются друг от друга своей размерностью в системе физических величин, принятой для их измерения. Например, в системе СИ сила измеряется в ньютонах (Н), давление в паскалях (Па), заряд в кулонах (Кл), но эти единицы являются производными от основных единиц. Основные единицы системы СИ приведены в таб. 1.

Таблица 1. Основные единицы системы измерений СИ

Величина	Размерность	Наименование	Обозначение
Длина	L	метр	м
Масса	M	килограмм	кг
Время	T	секунда	с
Сила электрического тока	I	ампер	А
Термодинамическая температура	Θ	кельвин	К
Сила света	J	кандела	кд
Количество вещества	N	моль	моль

Размерности производных единиц выражаются через размерности основных единиц [9], например, размерность ньютона равна LMT^{-2} , размерность паскаля – $L^{-1}MT^{-2}$, размерность кулона – TI .

Кроме системы СИ, есть и другие системы физических величин, например, LMT , в ней основными единицами являются длина, масса и время. На её основе были образованы такие системы единиц, как СГС (сантиметр-грамм-секунда), МКС (метр-килограмм-секунда). На основе системы LFT , в которой основными величинами являются длина, сила и время, создана система единиц МКГСС (метр-килограмм сила-секунда). В системе LT кинематических величин P .

Бартини, используемой для решения изобретательских задач [10], основными единицами являются длина и время.

В общем случае, для любой системы измерения физических величин, размерность $[x]$ входной величины x эффекта и размерность $[y]$ выходной величины y эффекта можно задать в виде

$$[x] = [A_1^{b_1} A_2^{b_2} \dots A_i^{b_i} A_{i+1}^{b_{i+1}} \dots A_k^{b_k}], [y] = [A_1^{c_1} A_2^{c_2} \dots A_i^{c_i} A_{i+1}^{b_{i+1}} \dots A_k^{c_i}], \quad (1)$$

где A_i – известные размерности основных физических величин в принятой системе физических величин, причем $A_i \neq 0$, $i = 1, 2, \dots, k$, где k – количество основных единиц системы размерностей, b_i , c_i – показатели степени, вещественные числа.

Зададим входную матрицу \mathbf{X} эффекта и выходную матрицу \mathbf{Y} эффекта квадратными симметричными диагональными матрицами размером $k \times k$ с главными диагоналями соответственно

$$\text{diag } \mathbf{X} = \{A_1^{b_1}, A_2^{b_2}, \dots, A_i^{b_i}, A_{i+1}^{b_{i+1}}, \dots, A_k^{b_k}\}, \text{diag } \mathbf{Y} = \{A_1^{c_1}, A_2^{c_2}, \dots, A_i^{c_i}, A_{i+1}^{b_{i+1}}, \dots, A_k^{c_i}\},$$

остальные элементы матриц нулевые, т.е.

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} A_1^{b_1} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & A_k^{b_k} \end{bmatrix}, \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} A_1^{c_1} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & A_k^{c_k} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

и введем передаточную матрицу $\mathbf{W}(\mathbf{d})$ эффекта от входа \mathbf{X} к выходу \mathbf{Y} :

$$\mathbf{W}(\mathbf{d}) = \mathbf{Y}(\mathbf{X})^{-1} = \begin{bmatrix} A_1^{c_1 - b_1} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & A_k^{c_k - b_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1^{d_1} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & A_k^{d_k} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $\mathbf{d} = \{d_1, d_2, \dots, d_i, d_{i+1}, \dots, d_k\}$ – конечное множество показателей степеней размерностей диагональных элементов A_i матрицы $\mathbf{W}(\mathbf{d})$, $d_i = c_i - b_i$, при $d_i = 0$, $i = 1, 2, \dots, k$, получаем единичную диагональную матрицу $\mathbf{W}(\mathbf{d}) = \mathbf{E}$.

Например, для $k=3$ в системе СГС входная величина x эффекта, сила, измеряемая в динах, будет иметь входную матрицу

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} A_1^{b_1} & 0 & 0 \\ 0 & A_2^{b_2} & 0 \\ 0 & 0 & A_3^{b_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L^1 & 0 & 0 \\ 0 & M^1 & 0 \\ 0 & 0 & T^{-2} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Следовательно, информация о входе заключена в названиях букв L, M, T и показателей степеней при них. В системе СИ ($k=7$) главная диагональ входной матрицы X для силы, измеряемой в ньютонах, будет иметь вид

$$\text{diag} \mathbf{X} = \{L^1, M^1, T^{-2}, I^0, \Theta^0, J^0, N^0\},$$

остальные элементы будут нулевыми. Обратим внимание, что первые три элемента главной диагонали совпадают с первыми тремя элементами в матрице (4), так как дина совпадает по размерности с ньютоном: $1 \text{ дин} = 10^{-5} \text{ Н}$.

Аналогично про содержание информации можно сказать и о выходной матрице эффекта, и о его передаточной матрице. Кроме того, передаточные матрицы эффектов являются размерностными эквивалентами передаточных функций динамических звеньев в теории автоматического управления.

4. Пространственные, временные и вещественно-полевые ресурсы в LT-базисе Бартини

Рассмотрим частный случай системы физических величин с двумя основными единицами – длиной L и временем T для описания физических эффектов. Такая система разработана выдающимся советским авиаконструктором Робертом Людвиговичем Бартини (Roberto Oros di Bartini, итал., 1897–1974). Система Бартини (рис. 4.1.) обычно задается в виде таблицы [11], в строках которой приведена размерность в единицах длины L^m , а в столбцах – размерность в единицах времени T^n . В клетке на пересечении L^m и T^n указаны физические величины, имеющие размерность $L^m T^n$, где m и n – целые числа. Например, на пересечении L^1 и T^{-1} находится клетка с линейной скоростью [м/с]. Реализуемые физические величины имеют размерность $|m+n| \leq 3$. Любая клетка в таблице Бартини означает какой-то закон сохранения. Например, равенство $L^1 T^0 = \text{Const}$ клетки длины означает закон сохранения постоянства длины между двумя точками твердого тела. Равенство $L^3 T^0 = \text{Const}$ клетки объема означает закон сохранения постоянства объема несжимаемой жидкости. Таким образом, изменение агрегатного состояния от твердого тела к жидкости можно математически выразить сменой соответствующих размерностей в законе сохранения.

		L^{-3}	L^{-2}	L^{-1}	L^0	L^1	L^2	L^3	L^4	L^5	L^6	
T^{-6}								$L^3 T^{-6}$	$L^4 T^{-6}$	Изменение мощности	Скорость передачи мощности	0
T^{-5}	-9						Изменение давления	Поверхностная мощность	Скорость изменения силы	Мощность	Скорость передачи энергии	1
T^{-4}	-8					Изменение плотности тока	Давление	Угловое ускорение массы	Сила	Момент силы	Скорость передачи энергии	2
T^{-3}	-7				Изменение углового ускорения	Плотность тока	Напряженность эл-маг поля	Ток	Скорость смещения заряда	Момент количества движения	Момент действия	3
T^{-2}	-6				Массовая плотность	Ускорение	Разность потенциалов	Масса	Магнитный момент	Момент инерции		4
T^{-1}	-5		Изменение объемной плотности	Угловое ускорение	Частота	Скорость	Объемность 2-х мерная	Количество магнитных линий	Скорость смещения объема			5
T^0	-4	$L^{-3} T^0$	$L^{-2} T^0$	Изменение проводимости	Безразмерные константы	Длина	Поверхность	Расход объемный	Объем пространственный			6
T^1	-3	$L^{-3} T^1$	Изменение магнитной проницаемости	Проводимость	Период	Длиительность расстояния	$L^2 T^1$					7
T^2	-2	$L^{-3} T^2$	Магнитная проницаемость	$L^{-1} T^2$	Поверхность времени	$L^1 T^2$						8
T^3	-1	$L^{-3} T^3$	$L^{-2} T^3$	$L^{-1} T^3$	Объем времени							9
T^4	0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Рис. 4.1. Система кинематических величин Бартини

Определение физических величин в системе Бартини или LT-базисе наиболее полно соответствует таким понятиям ТРИЗ, как оперативная зона (ОЗ), оперативное время (ОВ), вещественно-полевые ресурсы (ВПР). В АРИЗ ОЗ – это зона действия конфликта между инструментом и изделием в пространстве определенной мерности. Если конфликт происходит в точке, то пространство ОЗ имеет мерность L^0 . Если конфликт происходит по линии, то пространство ОЗ имеет мерность L^1 , и т.д. для более высоких мерностей пространства. Обратим внимание, что в законах развития технических систем (ЗРТС), используемых в ТРИЗ, существует тренд геометрического развития «точка-линия-поверхность-объем». Этот тренд в таблице задается последовательностью клеток с размерностями $L^0T^0 \rightarrow L^1T^0 \rightarrow L^2T^0 \rightarrow L^3T^0$. Так как $T^0=1$, то получаем только тренд пространственных ресурсов $L^0 \rightarrow L^1 \rightarrow L^2 \rightarrow L^3$. Часто приводимый пример в ТРИЗ этого ресурса представлен на рис. 4.2 [12]. Пример представляет собой развитие контакта взаимодействия инструмента для ужения с рыбой – от точки в удочке с одним крючком до объема в кошельковом неводе.

Оперативное время, или ресурс времени для разрешения конфликта в АРИЗ, разделяется на три времени: до конфликта T_1 , время собственно конфликта T_2 (т.е. время контакта инструмента и изделия), и время после конфликта T_3 . Время получается дискретным. Возможные разрешения противоречия во времени разделяются на три класса: разрешение противоречия в прошлом (до конфликта, что-то сделать заранее), разрешение противоречия в настоящем, и разрешение противоречия в будущем (после конфликта что-то исправить).



Рис. 4.2. Тренд развития средств ловли рыбы

Если рассмотреть LT таблицу Бартини, то такого понятия, как ОВ, там нет, как нет и понятия ОЗ. Вообще не существует метода технического творчества Бартини, вернее, неизвестно, в чем этот метод заключался, если он и был, так как нет печатных трудов Бартини, где бы этот метод был изложен. Поэтому то, что называют «методом» Бартини, есть реконструкция, впервые изложенная в [13,14]. Поэтому попробуем реконструировать тренд временных ресурсов,

который бы определял некоторые свойства ОВ, подобно тому, как пространственный тренд «точка-линия-поверхность-объём» определяет геометрические свойства ОЗ.

Чтобы исключить из конфликта пространственный ресурс, выбираем на рис. 3.1. столбец с $L^0=1$. Это и будет тренд временных ресурсов, т.е. ресурсов времени для разрешения конфликта. Выберем 5 клеток: «поверхность времени- период- безразмерные величины- частота- угловое ускорение», т.е. $T^2 \rightarrow T^1 \rightarrow T^0 \rightarrow T^{-1} \rightarrow T^{-2}$. Обозначим входное воздействие со стороны инструмента на изделие $g_{вх}$. Определим, вид воздействия на этом тренде. Если судить по названиям клеток - угловое ускорение (обозначим ε), частота (или угловая скорость ω , размерность та же T^{-1}), то $g_{вх}$ есть угловое воздействие, вращение изделия инструментом. Клетка тренда $T^0=1$ имеет нулевую размерность, т.е. это безразмерная величина, а угол α поворота в системе Бартини и есть безразмерная величина, измеряемая в радианах. По закону сохранения, в клетке $L^0 T^0$ $g_{вх} = \alpha = \text{Const}$. Это означает, что инструмент, касаясь изделия в точке, повернул изделие на некоторый угол α и дальше сохраняет это положение.

Аналогично в клетке $L^0 T^{-1}$ $g_{вх} = \alpha/t = \omega = \text{Const}$. Это означает, что инструмент, касаясь изделия в точке, поворачивает изделие с постоянной угловой скоростью ω . В клетке $L^0 T^{-2}$ $g_{вх} = \omega/t = \varepsilon = \text{Const}$. Это означает, что инструмент, касаясь изделия в точке, поворачивает изделие с постоянным угловым ускорением ε . В клетке $L^0 T^1$ выполняется закон постоянства периода $T = \text{Const}$. Можно предположить, что движение периодическое, колебательное. Инструмент, касаясь изделия в точке, поворачивает изделие с постоянным периодом колебаний то в одну, то в другую сторону. Колебания, например, математического маятника означают частный случай углового вращения. Если поворот осуществляется только в одну сторону, то при $T = \text{Const}$, получаем уже рассмотренный случай $\omega = 1/T = \text{Const}$.

Выводы по ОЗ и ОВ можно сделать следующие:

а) инструмент в ОВ действует на изделие либо в точке, либо по линии, либо по поверхности, либо по объему.

б) ресурсы пространства образуют тренд, каждый элемент которого получается дифференцированием предыдущего элемента по пространству L , или делением на L для средних значений, если идти по тренду справа налево. Если идти по тренду слева направо, то вместо операции дифференцирования используется интегрирование по пространству L .

в) инструмент в ОЗ действует на изделие либо с нулевой скоростью, либо с постоянной скоростью, либо с постоянным ускорением, либо периодически с постоянным периодом действия.

г) ресурсы времени образуют тренд, каждый элемент которого получается дифференцированием предыдущего элемента по времени, или делением на время для средних значений, если идти по тренду снизу вверх. Если идти по тренду

вниз, то вместо операции дифференцирования используется интегрирование по времени.

Тренды вещественно-полевых ресурсов (ВПР) находятся на диагоналях таблицы. Главный тренд ВПР – это главная диагональ при $m+n=0$. Элементы любого тренда ВПР отличаются по размерности от соседнего элемента на множитель линейной скорости L^1T^{-1} . В [10] рассмотрены методы использования трендов ресурсов для решения изобретательских задач.

4.1. Вопросы для самоконтроля по 3 и 4 главам

1. Какие физические величины являются основными в системе СИ?
2. Написать размерность ватта в системе СИ через основные единицы
3. Написать размерность ньютона в системе СИ через основные единицы
4. Как находятся матрицы входа и выхода физического эффекта?
5. Что такое передаточная матрица физического эффекта?
6. Найти передаточную матрицу обратного пьезоэффекта в системе СИ.
7. Какие основные единицы образуют систему кинематических величин Бартини?
8. Почему система Бартини применяется для решения изобретательских задач?
9. Как устроена таблица Бартини?
10. Что такое тренды ресурсов в системе Бартини?
11. Что такое тренд ресурсов оперативной зоны?
12. Что такое тренд ресурсов оперативного времени?

5. Физические эффекты в системе Бартини

Математическая связь физических эффектов и системы ЛТ кинематических величин впервые отмечена в [15]. В системе Бартини матрицы входов и выходов эффектов, а также передаточные матрицы имеют размер 2×2 . Благодаря этому возможны наглядные геометрические построения графов эффектов на плоскости.

Рассмотрим пример определения передаточной матрицы для прямого пьезоэлектрического эффекта. Эффект имеет входное воздействие – силу F , размерность которой в ЛТ базисе $L^4 T^{-4}$, физический объект – пьезокристалл, выход – электрический заряд Q (или количество электричества) с размерностью $L^3 T^{-2}$. По выражению (2) запишем вход F и выход Q в виде матриц, содержащих соответствующие размерности:

$$F = \begin{bmatrix} L^4 & 0 \\ 0 & T^{-4} \end{bmatrix}, Q = \begin{bmatrix} L^3 & 0 \\ 0 & T^{-2} \end{bmatrix}.$$

Найдем передаточную матрицу W_1 пьезокристалла из выражения (3)

$$W_1 = Q \cdot F^{-1} = \begin{bmatrix} L^3 & 0 \\ 0 & T^{-2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} L^4 & 0 \\ 0 & T^{-4} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} L^{-1} & 0 \\ 0 & T^2 \end{bmatrix},$$

Внешне передаточная матрица выглядит так же, как и матрицы входных и выходных физических величин эффекта. В таблице Бартини указана только её размерность $L^{-1} T^2$, а сама физическая величина не названа, однако она физически реализуема. Следовательно, можно утверждать, что в клетке $L^{-1} T^2$ ЛТ-системы локализуется не только размерность некоторой физической величины, но и пьезоэлектрический физический эффект, заданный передаточной матрицей физического объекта – пьезокристалла, которым могут быть кварц, сегнетова соль, пьезокерамика – титанат бария ТБ-1, титанат бария-кальция ТБК-3, группа титаната цирконата свинца и т.п.

Для многих эффектов в указателях приводятся сведения о разных входных и выходных воздействиях одного и того же эффекта. Зависит это от конструкции устройства, в котором используется эффект. Например, для тензорезистивного эффекта, в котором электрическое сопротивление тензорезистора зависит от нагрузки, создающей деформацию, входом может быть линейная деформация x , измеряемая в единицах длины. Выходом является электрическое сопротивление r . Тогда входная X и выходная R матрицы равны

$$X = \begin{bmatrix} L^1 & 0 \\ 0 & T^0 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} L^{-1} & 0 \\ 0 & T^1 \end{bmatrix}.$$

Найдем передаточную матрицу W_2 тензорезистора:

$$W_2 = R \cdot X^{-1} = \begin{bmatrix} L^{-1} & 0 \\ 0 & T^1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} L^1 & 0 \\ 0 & T^0 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} L^{-2} & 0 \\ 0 & T^1 \end{bmatrix}$$

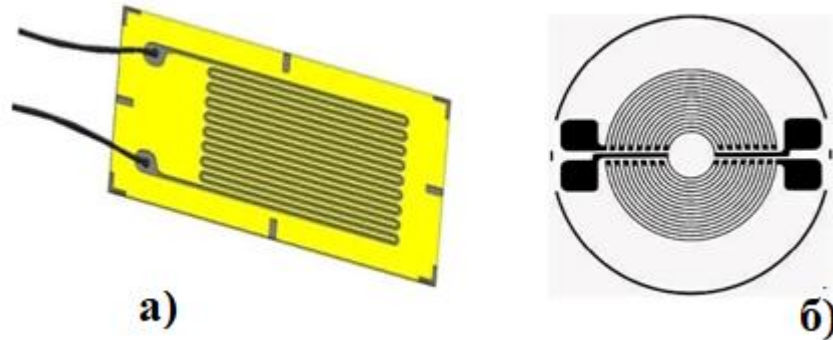


Рис. 5.1. Тензорезисторы, а) линейных деформаций, б) давления

Такой тензорезистор представляет собой проволочку, напыленную на подложку (рис.5.1а). Проволочка изготавливается из тензорезистивного материала например, константана. Тензорезистор наклеивается на измеряемую поверхность изделия. При возникновении деформации, например, трещины в изделии, проволока удлиняется, и её сопротивление изменяется.

Тензорезистивный эффект используется для измерения деформаций, давления, силы, смещения, ускорения, в качестве микрофонов. На рис. 5.1б представлен тензорезистор давления. Он приклеивается на поверхность мембраны и вместе с ней выгибается под действием давления, изменяя свое электрическое сопротивление. Для него передаточная матрица W_3 будут определяться отношением сопротивления к давлению, т.е.

$$W_3 = R \cdot P^{-1} = \begin{bmatrix} L^{-1} & 0 \\ 0 & T^1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} L^2 & 0 \\ 0 & T^{-4} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} L^{-3} & 0 \\ 0 & T^5 \end{bmatrix}.$$

Такая матрица должна быть названа передаточной матрицей датчика давления на основе тензорезистивного эффекта, т.е. некоторого устройства. Следовательно, в базе данных на основе ЛТ-таблицы в этой клетке будут храниться сведения уже об устройстве, предполагающем некоторую конструкцию. База данных необходима для синтеза имитационных схем размерностей технических систем. Примеры таких схем для тензорезисторов приведены на рис.5.2.



Рис. 5.2. Имитационные схемы размерностей тензорезисторов:
а) линейных перемещений, б) давления

Кроме одномерных физических эффектов, имеющих по одному входному воздействию и одному выходному результату, встречаются и многомерные физические эффекты, имеющие несколько входов и выходов. Рассмотрим, например, эффект Холла, заключающийся в возникновении разности потенциалов U_H на противоположных сторонах бруска, расположенного перпендикулярно силовым линиям магнитного поля с индукцией B , когда по бруску протекает ток I (рис. 5.3). Формула эффекта Холла имеет вид

$$U_H = R_H \frac{IB}{d},$$

где R_H – постоянная Холла, зависящая от величины электрического заряда носителей тока (для металлов – электрона), и их концентрации (число/м³), d – толщина бруска. В эффекте, открытом в 1879 году, Э. Холл использовал тонкий брусок из золота.

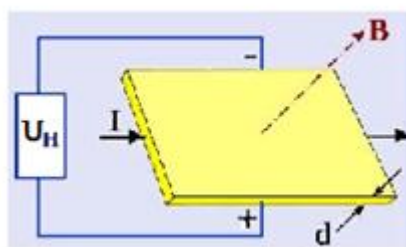


Рис. 5.3. Эффект Холла

Найдем передаточные матрицы эффекта Холла по двум входам, току и индукции:

$$W_4 = \frac{U_H}{I} = \begin{bmatrix} L^2 & 0 \\ 0 & T^{-2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} L^3 & 0 \\ 0 & T^{-3} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} L^{-1} & 0 \\ 0 & T^1 \end{bmatrix},$$

$$W_5 = \frac{U_H}{B} = \begin{bmatrix} L^2 & 0 \\ 0 & T^{-2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} L^0 & 0 \\ 0 & T^{-1} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} L^2 & 0 \\ 0 & T^{-1} \end{bmatrix},$$

где размерность магнитной индукции B равна $[L^0 T^{-1}]$, как она находится, см. ниже, раздел 6. Имитационная схема размерностей эффекта Холла имеет три передаточных матрицы (рис.5.4.) Матрица W_6 единичная, она объединяет выходные сигналы эффекта в одно выходное воздействие U_H .

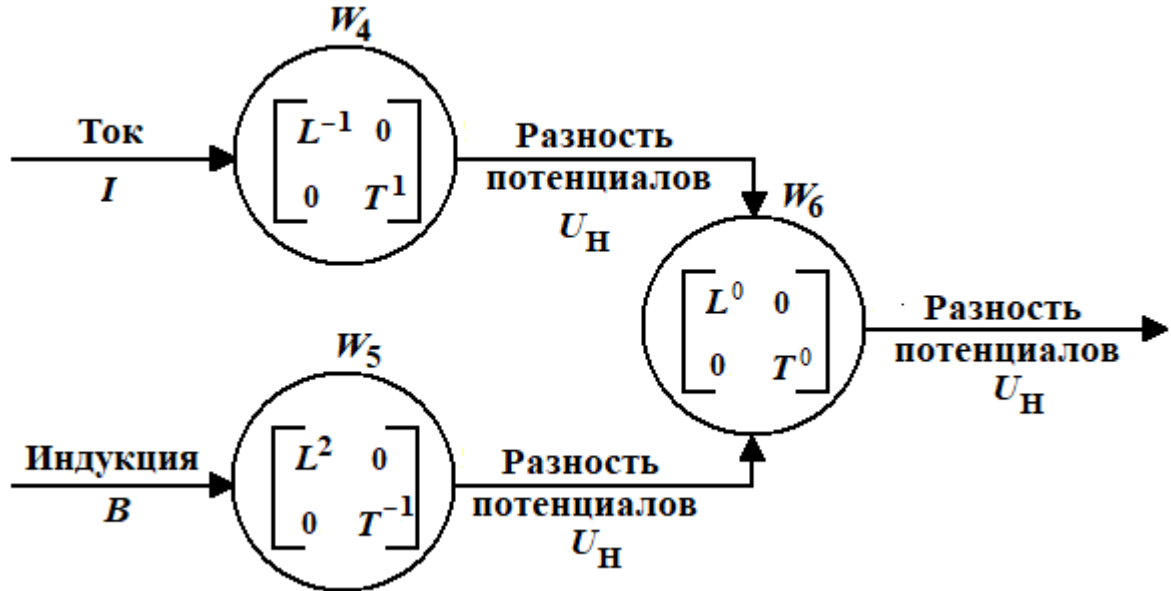


Рис. 5.4. Имитационная схема размерностей эффекта Холла

В таблице Бартини эффект Холла с входом по току помещается в клетке $L^{-1}T^1$, а с входом по магнитной индукции – в клетке L^2T^{-1} .

Имитационных схемы моделирования размерностей используются для выполнения домашнего задания [16] по курсу «Теория решения изобретательских задач». При моделировании физических эффектов с несколькими входами и выходами необходимо учитывать ресурсоемкость R схемы. Ресурсоемкость должна быть минимальной. Если передаточная матрица имеет вид

$$W = \begin{bmatrix} L^m & 0 \\ 0 & T^n \end{bmatrix},$$

то её ресурсоемкость равна

$$R = \sqrt{m^2 + n^2}.$$

Общая ресурсоемкость схемы равна сумме ресурсоемкостей передаточных матриц, задающих физический эффект. На рис. 5.5 представлен пример моделирования эффекта с двумя входами.



Рис. 5.5. Пример моделирования эффекта с двумя входами: а) передаточные матрицы, б) неправильная схема, в) правильная схема

В примере передаточные матрицы по первому W_{11} и второму W_{12} входам (рис. 5.5а) имеют наибольший общий множитель – матрицу $\begin{bmatrix} L^0 & 0 \\ 0 & T^{-1} \end{bmatrix}$. Её необходимо вынести отдельным блоком, как показано на рис. 5.5в. Ресурсоёмкость правильной схемы моделирования равна

$$\sqrt{1^2 + (-3)^2} + \sqrt{1^2 + 0^2} + \sqrt{0^2 + (-1)^2} = 5.16.$$

Неправильная схема моделирования представлена на рис. 5.5б. Её ресурсоёмкость равна

$$\sqrt{(-1)^2 + (-1)^2} + \sqrt{1^2 + (-4)^2} = 5.53.$$

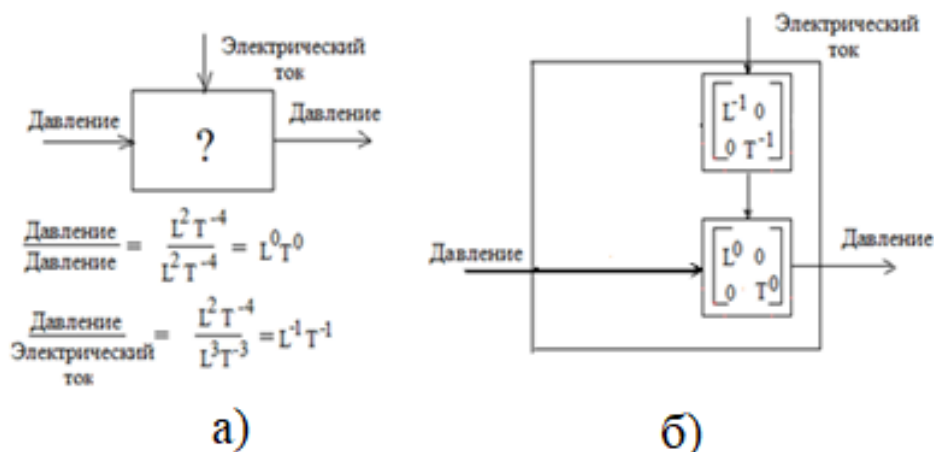


Рис. 5.6. Пример моделирования эффекта с двумя входами: а) расчет размерностей, б) схема моделирования

На рис. 5.6. представлен ещё один пример моделирования эффекта с двумя входами, когда одна входная величина является одновременно и выходной.

6. Поиск физических величин и их размерностей в таблице Бартини

Как показывает практика выполнения домашних заданий по курсу ТРИЗ, у студентов возникают трудности при работе с таблицей Бартини в отыскании нужных физических величин и их размерностей в ЛТ-базисе. Трудности следующие:

- а) размерности некоторых физических величин отсутствуют в таблице,
- б) в одной клетке могут находиться размерности разных физических величин,
- в) названия некоторых величин неоднозначны.

Разбор этих трудностей начнем с размерности массы, находящейся в клетке $[L^3T^{-2}]$ таблицы 2. Бартини начал создавать свою систему в 30-х годах прошлого века, когда системы СИ с её семи основными единицами, приведенными в табл.1, еще не было. Была система измерений с тремя основными единицами, относящаяся к типу LMT, т.е. длина-масса-время, или по-английски, Length-Mass-Time. Её основы предложил Гаусс, по-русски называется СГС – сантиметр-грамм-секунда. Поэтому Бартини ориентировался на систему СГС. Но для перехода в ЛТ систему необходимо исключить массу M , выразив её размерность через основные единицы – длину и время. Для этого было использовано предложение Максвелла, заключающееся в приравнивании размерностей гравитационной и инерционной масс. По второму закону Ньютона сила F равна: $F=ma$, где m – масса, a – линейное ускорение. По закону тяготения Ньютона сила F равна: $F=\gamma m_1 m_2 / r^2$, где γ – физическая константа, коэффициент всемирного тяготения, r – расстояние между массами m_1 и m_2 . Приравнявая силы и считая коэффициент γ безразмерным, получаем размерность массы:

$$[m] = [a][r^2] = L^1 T^{-2} \cdot L^1 T^0 \cdot L^1 T^0 = L^3 T^{-2}.$$

В этой же клетке находится и количество электричества или электрический заряд, в системе СИ измеряемый в кулонах. Действительно, по закону Кулона, сила взаимодействия F двух зарядов q_1 и q_2 , находящихся на расстоянии r , в системе СГС равна $F=q_1 q_2 / r^2$. Приравнявая размерности сил электрической и тяготения, получаем размерность электрического заряда $L^3 T^{-2}$.

Также в этой клетке у Бартини размещена физическая величина – количество магнетизма или магнитный заряд. Существование магнитного заряда предположил П. Дирак (1931 г.), однако его гипотеза экспериментально не подтвердилась. Магнитный заряд создается электрическим током. Но иногда понятие магнитного заряда как некоторой фиктивной величины используют для расчета статических магнитных полей, подобно расчетам в электростатике. В физических эффектах ТРИЗ понятие магнитный заряд пока не используется.

В соседней клетке справа $L^4 T^{-2}$ находится «магнитный момент» M , называемый так в системе СГС и имеющий размерность $[M]=[I][S]/[C]$, где I – ток, S – площадь, C – скорость света, физическая константа. В системе Бартини

эта константа размерная, м/с. Подставляем размерности тока, площади и линейной скорости из таблицы в размерность момента, получаем

$$[M] = L^3 T^{-3} \cdot L^2 T^0 / L^1 T^{-1} = L^4 T^{-2}.$$

В системе СИ эта величина называется не магнитным моментом, а электрическим дипольным моментом, и измеряется в кулонах, умноженных на метр. Действительно, так как кулон имеет в ЛТ-базисе размерность $L^3 T^{-2}$, а сдвиг на клетку вправо означает увеличение размерности на L^1 , то Кл·м приобретает размерность $L^4 T^{-2}$. В изобретательских задачах можно пользоваться тем и другим названием, так электрический дипольный момент с точки зрения физики вызывает возникновение магнитного момента. Так как магнитных зарядов не существует, силовое действие магнитов, магнитного поля, объясняется силовым действием электрических зарядов, электрического поля.

В системе СИ магнитным моментом называется величина с размерностью $[M] = [I][S] = L^3 T^{-3} \cdot L^2 T^0 = L^5 T^{-3}$, находящаяся на клетку вверх по диагонали от магнитного момента в системе СГС. Действительно, движение по диагонали вверх из любой клетки означает умножение её размерности на размерность линейной скорости. Кроме того, в этой же клетке находится и момент количества движения. Как это можно пояснить? Находим в системе СИ размерность количества движения $m \cdot V$, где V – линейная скорость. Попадаем в клетку $L^4 T^{-3}$, так как $[m] \cdot [V] = L^3 T^{-2} \cdot L^1 T^{-1} = L^4 T^{-3}$. Количество движения умножаем на плечо l , получаем момент количества движения $L^4 T^{-3} \cdot L^1 T^0 = L^5 T^{-3}$.

Рассмотрим некоторые тепловые величины. В системе СИ количество тепловой энергии или количество тепла измеряется в джоулях. Размерности в джоулях соответствует клетка ЛТ-системы «энергия» $L^5 T^{-4}$. Обратим внимание, что в джоулях измеряются любые виды энергии. В изобретательских задачах это энергия не только термических, но и механических, ультразвуковых, электрических, магнитных, световых (электромагнитных) полей излучения. Вторая важная характеристика термических полей температура. В системе СИ называется термодинамической температурой и измеряется в кельвинах. В ЛТ системе кельвинов нет. Но понятие «термодинамическая температура» имеет свою клетку и свою размерность. Она определяется через среднестатистическую кинетическую энергию \mathcal{E} движущихся молекул

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2} m V^2 = \frac{3}{2} k_B \Theta_k,$$

где $k_B = 1.380649 \times 10^{-23}$ Дж/К – физическая константа, постоянная Больцмана, Θ_k – термодинамическая температура, К. Постоянная Больцмана считается в системе Бартини безразмерной величиной, поэтому размерность термодинамической температуры совпадает с размерностью энергии, т.е. $[\Theta_k] = L^5 T^{-4}$.

Таблица 2. Верхний фрагмент LT таблицы

Dim.	L^1	L^2	L^3	L^4	L^5
T^{-5}			Поверхностная мощность, освещенность, светимость		Мощность, сила света, световой поток
T^{-4}	Градиент давления	Давление, механическое напряжение, предел упругости, прочности	Поверхностное натяжение	Сила	Энергия, работа, термодинамическая температура
T^{-3}	Плотность тока	Напряженность магнитного поля	Ток, массовый расход	Количество движения, импульс	Момент количества движения
T^{-2}	Линейное ускорение	ЭДС, разность потенциалов, электрическое напряжение	Масса, количество электричества	Магнитный момент, электрический дипольный момент	
T^{-1}	Линейная скорость	Обильность 2-х мерная, магнитный поток	Расход объемный		

При решении изобретательских задач, связанных с прохождением света, электромагнитных излучений, необходимо искать физические величины в области оптических измерений (рис.б.1.)

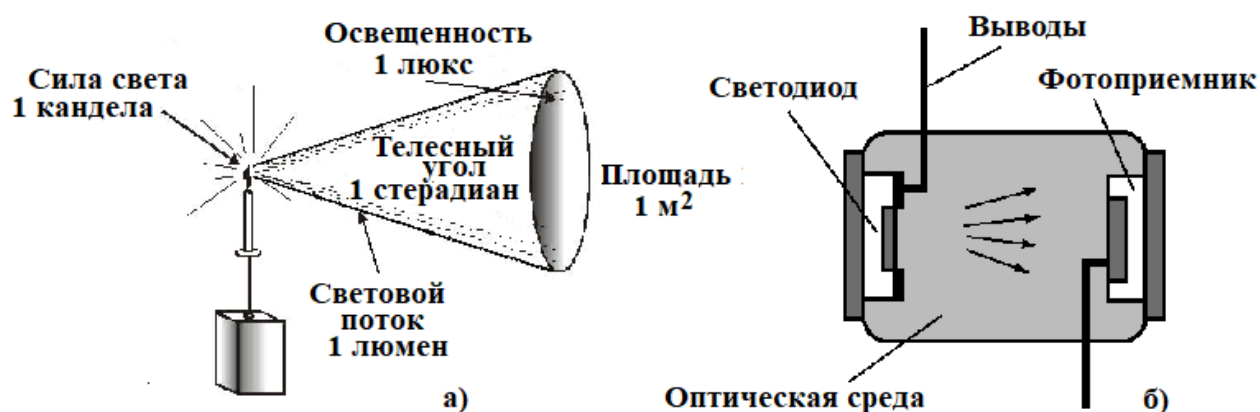


Рис. 6.1. Передача света в оптике, а) основные физические величины, б) оптронная пара

Определим размерности основных физических величин оптики (рис.6.1.a) в ЛТ таблице. Начинаем со световой энергии Э, в системе СИ измеряемой в джоулях и находящейся в клетке L^5T^{-4} . Далее найдем размерность силы света, измеряемой в СИ в канделах. Сила света – это количество световой энергии, переносимой в некотором направлении в единицу времени. Тогда размерность силы света равна L^5T^{-4} . $L^0T^{-1} = L^5T^{-5}$. Следовательно, сила света в канделах в таблице Бартини находится в той же клетке, где и мощность, измеряемая в ваттах.

Далее определим световой поток, измеряемый в люменах. Один люмен равен световому потоку, испускаемому точечным изотропным источником, с силой света, равной одной канделе, в телесный угол величиной в один стерadian: $1 \text{ лм} = 1 \text{ кд} \cdot \text{ср}$. Все угловые величины в системе Бартини безразмерные, так как являются частью окружности или сферы. Поэтому размерность люмена в ЛТ-базисе совпадает с размерность канделы и ватта. В одной клетке L^5T^{-5} находятся мощность, сила света и световой поток.

Если мы поделим световой поток на площадь, то в размерностях получим $L^5T^{-5} / L^2T^0 = L^3T^{-5}$. В системе Бартини эта клетка называется поверхностная мощность, в системе СИ – освещенность, измеряемая в люксах. Освещенность используется для характеристики фотоприемников (рис.6.1б) в оптронной паре, и вообще, для любой освещаемой поверхности. Характеристикой светодиода в оптронной паре является светимость, измеряемая в СИ либо в $\text{лм}/\text{м}^2$, либо в $\text{вт}/\text{м}^2$ (энергетическая светимость). Следовательно, в клетке L^3T^{-5} находится поверхностная мощность, освещенность и светимость.

Теперь перейдем к клетке L^4T^{-4} , где располагается сила F, измеряемая в СИ в ньютонах. В изобретательских задачах силовое воздействие создается механическими, электрическими и магнитными полями. Поэтому и сила может иметь соответствующую природу. В геометрическом смысле эта сила приложена в точке тела, на которое она действует, и вызывает либо линейное перемещение, либо линейную деформацию, как, например, в пьезоэффекте, действуя на пьезокристалл. Если сдвинуться на клетку влево $L^4T^{-4} \cdot L^{-1}T^0 = L^3T^{-4}$, то получим так называемое поверхностное натяжение, или точнее, силу поверхностного натяжения, которая действует в капиллярном эффекте, и характеризует механическое поле сил поверхностного натяжения. В капилляре сила поверхностного натяжения действует на жидкость по линии – окружности, создавая выпуклый или вогнутый мениск.

Дальше сдвигаясь на клетку влево, получаем давление $L^4T^{-4} \cdot L^{-2}T^0 = L^2T^{-4}$, в СИ измеряемое в паскалях ($\text{Па} = \text{Н}/\text{м}^2$). Это сила, распределённая по поверхности, т.е. приложенная к каждой точке поверхности. Поэтому, какую силовую величину – силу или давление, выбирать для входной или выходной величины эффекта, зависит от конструкции устройства, в котором реализуется эффект.

Поле визуальное или поле света относится к электромагнитным полям, поэтому оно тоже обладает силовым механическим воздействием, для этого случае используется понятие сила L^4T^{-4} , измеряемая в ньютонах, но не сила света L^5T^{-5} , измеряемая в канделах. Механическое действие света проявляется, например, в эффекте солнечного паруса. Солнечный парус — приспособление, использующее давление солнечного света или лазера на зеркальную поверхность для приведения в движение космического аппарата. Частицы света — фотоны — имеют импульс и передают его любой освещаемой поверхности, создавая давление. Величину давления солнечного света впервые измерил русский физик Пётр Лебедев в 1900 году. Размерность давления P света можно рассчитать через размерность силы F - $L^4T^{-4} \cdot L^{-2}T^0 = L^2T^{-4}$ или через размерность интенсивности света I_p , в СИ измеряемой в $вт/м^2$, деленной на скорость света $м/с$ - $L^3T^{-5}/L^1T^{-1} = L^2T^{-4}$.

В клетке L^2T^{-3} находится размерность напряженности H магнитного поля, измеряемая в СИ в А/м. Размерность тока делим на размерность длины $L^3T^{-3}/L^1T^0 = L^2T^{-3}$, получаем размерность H . Размерность магнитной индукции B , измеряемой в Си в теслах, получим из формулы для ЭДС, возникающей в проводнике длиной ℓ движущемся с линейной скоростью V в магнитном поле с магнитной индукцией B :

$$\text{ЭДС} = B\ell V \sin\alpha,$$

где α – угол между вектором скорости и направлением индукции. Тогда $B = \text{ЭДС} / (\ell V \sin\alpha)$. Для размерностей получаем $L^2T^{-2} / (L^1T^0 \cdot L^1T^{-1} \cdot L^0T^0) = L^0T^{-1}$. Тот же результат можно получить через силу F , действующую на проводник длиной ℓ с током I в магнитном поле с индукцией B , $F = B\ell I \sin\alpha$. Таким образом, в ЛТ базисе магнитная индукция B попадает в клетку частоты или угловой скорости. Размерность магнитного потока Φ , измеряемого в СИ в веберах, можно найти из размерностей магнитной индукции B или ЭДС, $\Phi = BS$, где S – площадь, или $\text{ЭДС} = -d\Phi/dt$, откуда для размерностей $[\Phi] = [\text{ЭДС}][t]$:

$$L^0T^{-1} \cdot L^2T^0 = L^2T^{-2} \cdot L^0T^1 = L^2T^{-1}.$$

Следовательно, магнитный поток попадает в клетку с физической величиной под названием «двухмерная обильность».

Как понять, что такое двухмерная обильность? Обратимся к соседним клеткам. Справа от неё находится клетка – расход объемный L^3T^{-1} , применительно к системе СИ это размерность $м^3/с$. Что такое расход объемный, понятно. Представим, например, трубу с охладителем, водой, по которой проходит определенное количество кубометров воды в секунду. В клетке L^2T^{-1} вода должна проходить не через объем V трубы, а через некоторую площадь S ,

так как геометрическая размерность двумерной обильности на единицу меньше. Представим водохранилище, имеющее площадь поверхности S , которую иногда называют «зеркало вод». Под действием солнца вода с поверхности испаряется, и зеркало вод уменьшается, либо под действием дождей зеркало вод увеличивается. Важно знать, как быстро уменьшается или увеличивается зеркало вод во времени, т.е. скорость изменения площади поверхности. Делим площадь S на время t , получаем двумерную обильность.

Определим размерность электрического сопротивления R , измеряемого в СИ в омах. По закону Ома $R=U/I$, для размерностей получаем $L^2T^{-2}/L^3T^{-3}=L^{-1}T^1$. Таким образом, электрическое сопротивление находится в клетке проводимость (табл.3), а электрическая проводимость, измеряемая в СИ в сименсах, как величина обратная R , имеет размерность L^1T^{-1} . Размерность электрической емкости C , измеряемой в СИ в фарадах, легко найти из выражения $T=RC$, где T – постоянная времени цепи заряда конденсатора, $C=T/R$. Размерность емкости равна $L^0T^1/L^{-1}T^{-1}=L^1T^0$. Электрическая емкость находится в одной клетке с длиной. В этой же клетке у Бартини находится термин «самоиндукция». В системе СИ такой величины нет, самоиндукция – это явление возникновения ЭДС индукции в проводящем контуре при изменении протекающего через контур тока. Размерность индуктивности L , измеряемой в СИ в генри, проще всего определить из формулы резонансной частоты ω колебательного контура

$$\omega = 1/\sqrt{LC}, L=1/(\omega^2/C).$$

Откуда $L^0T^0/(L^0T^{-1} \cdot L^0T^{-1} \cdot L^1T^0) = L^{-1}T^2$, индуктивность размещается в клетке $L^{-1}T^2$.

Определим размерность абсолютной магнитной проницаемости среды μ_0 , измеряемой в СИ в генри, деленном на метр, Гн/м. Сдвигаемся из клетки индуктивности $L^{-1}T^2$ на клетку влево, тем самым делим размерность индуктивности на единицу длины. Получаем $L^{-2}T^2$ и попадаем в клетку, называемую у Бартини магнитная проницаемость. Размерность относительной магнитной проницаемости среды μ получается делением размерности на абсолютную магнитную проницаемость вакуума. Поэтому относительная магнитная проницаемость среды попадает по размерности в безразмерные константы L^0T^0 . Абсолютная магнитная проницаемость среды μ_0 является коэффициентом пропорциональности между напряженностью H и индукцией B магнитного поля, т.е. $B = \mu_0 H$. Проверяем размерности: $L^0T^{-1} = L^{-2}T^2 \cdot L^2T^{-3}$, получаем тождество.

Определим размерность абсолютной диэлектрической проницаемости среды ϵ_0 , измеряемой в СИ в фараде, деленном на метр, Ф/м. Сдвигаемся из клетки емкости L^1T^0 на клетку влево, тем самым делим размерность емкости на единицу длины. Получаем L^0T^0 и попадаем в клетку безразмерных констант. Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ среды также является

безразмерной величиной. Такая асимметрия между размерностями магнитной μ_0 и диэлектрической ϵ_0 проницаемостями среды в системе Бартини сохранилась от системы СГСЭ.

Таблица 3. Нижний фрагмент LT таблицы

Dim.	L^{-2}	L^{-1}	L^0	L^1	L^2
T^{-1}			Частота, угловая скорость, магнитная индукция	Линейная скорость	Обильность двухмерная, магнитный поток
T^0		Изменение проводимости	Безразмерные константы	Длина, емкость, самоиндукция	Поверхность
T^1	Изменение магнитной проницаемости	Проводимость	Период	Длительность расстояния	
T^2	Магнитная проницаемость	Индуктивность	Поверхность времени		
T^3			Объем времени		

Напряженность электрического поля E в системе СИ измеряется в ньютонах, деленных на кулон, Н/Кл, или в вольтах, деленных на метр, В/м. Из этого определения получаем размерность напряженности E электрического поля:

$$L^4 T^{-4} / L^3 T^{-2} = L^2 T^{-2} / L^1 T^0 = L^1 T^{-2}.$$

Следовательно, напряженность электрического поля попадает в клетку линейное ускорение LT таблицы. Индукция D электрического поля вычисляется из выражения $D = \epsilon_0 E$. Тогда размерность индукции электрического поля равна $L^0 T^0 \cdot L^1 T^{-2} = L^1 T^{-2}$ и аналогично попадает в ту же клетку линейное ускорение.

Названия физических величин «поверхность времени», «объем времени», «длительность расстояния» относятся к введенному в работах Бартини трехмерному времени [17], т.е. времени по каждой из трех пространственных координат. Пока в ТРИЗ трехмерное время не используется и здесь не рассматривается.

6.1. Вопросы и задания для самоконтроля по 5 и 6 главам

1. Как строится имитационная схема моделирования размерностей физического эффекта в базисе Бартини?

2. Что такое многомерный физический эффект?
3. Построить имитационную схему моделирования размерностей физического эффекта памяти формы
4. Построить имитационную схему моделирования размерностей термистора
5. Построить имитационную схему моделирования размерностей фокусирующей линзы
6. Что такое ресурсоемкость физического эффекта и как её рассчитать?
7. Построить имитационную схему моделирования размерностей элемента со входами по давлению и линейной скорости и с выходами по мощности и линейному перемещению и рассчитать ей ресурсоемкость.
8. Как найти размерность физической величины, если она не приведена в таблице Бартини?
9. Какие мировые физические константы имеют в системе Бартини ненулевую размерность?
10. Что такое обильность двумерная в системе Бартини, какой физический смысл она имеет?
11. Найти размерность электрического сопротивления в базисе Бартини, измеряемого в системе СИ в омах.
12. Найти размерность освещенности поверхности в базисе Бартини, измеряемой в системе СИ в люксах.
13. Как найти размерность по Бартини физической величины, измеряемой в системе СИ в канделах?
14. Как найти размерность давления в системе Бартини, действующего на солнечный парус?
15. Найти размерность индукции электрического поля. в LT-базисе.

7. Тренды эффектов в LT-базисе

В главе 4 рассмотрено понятие трендов ресурсов. Все элементы тренда должны иметь некоторое одинаковое свойство, которое называется инвариантом. Для построения тренда эффектов в LT- базисе будем считать таким инвариантом передаточную матрицу эффекта W , т.е. все эффекты, имеющие одну и ту же передаточную матрицу, входят в один тренд. Тренд эффектов будем строить следующим образом.

1. Выбираем в таблице Бартини любой тренд пространственных, временных или вещественно-полевых ресурсов.
2. Одну из величин на тренде будем считать входным воздействием эффекта.
3. По справочникам-указателям физических эффектов, научной литературе, находим название эффекта, а, следовательно, и выходную величину.
4. По размерностям входа и выхода находим инвариант – передаточную матрицу эффекта W
5. Сдвигаемся по тренду последовательно на одну клетку в ту или (и) в другую сторону и находим новые входные воздействия по их размерностям в таблице Бартини
6. Умножаем новое входное воздействие на инвариант W и находим выход эффекта, а тем самым и определяем его название.

Пункты 1 и 2 выполнять не требуется, если какой-либо эффект уже задан, и мы хотим построить тренд, в который будет входить этот эффект.

7.1. Пример нахождения эффектов индуктивного тренда

В качестве одного из эффектов тренда выберем уже упоминавшийся прямой пьезоэлектрический эффект, входным воздействием в котором является сила F , приложенная к пьезокристаллу, а выходом – электрический заряд Q , возникающий на пластинах (рис.7.1в). Находим передаточную матрицу W_7

$$W_7 = QF^{-1} = \begin{bmatrix} L^3 & 0 \\ 0 & T^{-2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^4 & 0 \\ 0 & T^{-4} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} L^{-1} & 0 \\ 0 & T^2 \end{bmatrix}.$$

Сдвинемся по таблице Бартини относительно клетки силы L^4T^{-4} на одну клетку вправо, т.е. двигаемся по тренду пространственных ресурсов. Попадаем в клетку L^5T^{-4} , в которой размещается энергия и термодинамическая температура, измеряемые в системе СИ в джоулях. Но одновременно в этой же клетке находится и размерность момента вращения $M_{вр.}$, измеряемого в системе СИ в ньютонах, умноженных на метр (1 Дж=1 Н·м). Будем считать момент вращения $M_{вр.}$ входным воздействием следующего элемента тренда. Физика с геометрией такого перехода имеет следующее простое объяснение. В пьезоэффекте сила F

прикладывается в точке и действует по прямой линии на пьезокристалл. С точки зрения полей, используемых в ТРИЗ, это воздействие типа механического поля давления. В следующем, пока неизвестном эффекте, входное воздействие – момент $M_{вр.}$, действующий по окружности и определяемый по известной формуле $M_{вр.}=F \cdot \ell$, где ℓ - плечо силы. Поэтому это воздействие можно отнести к механическому полю центробежных сил.

По заданному входу и передаточной матрице W_7 тренда находим выходную величину

$$W_7 M_{вр} = \begin{bmatrix} L^{-1} & 0 \\ 0 & T^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^5 & 0 \\ 0 & T^{-4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L^4 & 0 \\ 0 & T^{-2} \end{bmatrix} = M,$$

где M – магнитный момент, или электрический дипольный момент.

В справочнике [4] такой вход и выход имеет эффект Барнетта. Эффект показывает связь атомных магнитных моментов с механическими моментами и заключается в намагничивании тел путем их вращения при отсутствии внешнего магнитного поля. Эффект реализуется в ферромагнетиках, таких как железо Чиоффи, никель, кобальт, пермаллой, трансформаторная сталь, армко-железо и т.п. Во вращающемся с постоянной угловой скоростью ω вокруг неизменной оси z образце (рис. 7.1г), элементарные магнетики его материала представляют собой своеобразные гироскопы, обладающие механическим моментом количества движения и магнитным моментом. Эффект проявляется на телах удлиненной геометрической формы и проявляется во всём объеме ферромагнетика. Результирующая магнитного поля направлена вдоль оси вращения. Эффект открыт Сэмюэлем Барнеттом в 1909 году. Физический эффект применяется для исследования природы и строения ферромагнитных веществ.

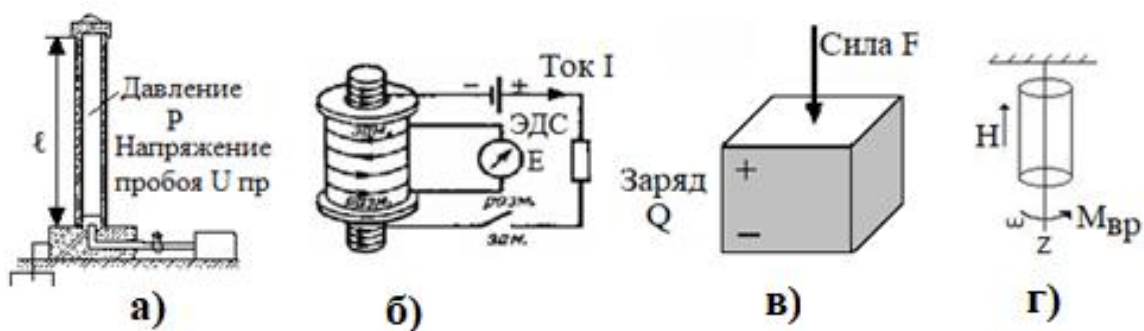


Рис. 7.1. Индуктивный тренд развития эффектов

Другие эффекты тренда будем искать, сдвигаясь от клетки силы $L^4 T^{-4}$ влево. Пусть входом будет величина с размерностью $L^3 T^{-4}$. Тогда выход получаем умножением на передаточную матрицу эффекта

$$E = \begin{bmatrix} L^{-1} & 0 \\ 0 & T^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^3 & 0 \\ 0 & T^{-4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L^2 & 0 \\ 0 & T^{-2} \end{bmatrix}, \quad (7.1)$$

где E – разность потенциалов или электродвижущая сила (ЭДС), измеряемые в системе СИ в вольтах. Входной величиной является поверхностное натяжение. Допустим, что физического эффекта преобразования этой механической величины в электрическое напряжение или в ЭДС пока не обнаружено. Поэтому поступим следующим образом, Найдем электрическую величину с размерностью заданного входа L^3T^4 . Для этого из клетки L^3T^4 спустимся ниже в клетку L^3T^3 , где находится электрический ток, измеряемый в системе СИ в амперах. Отсюда можно сделать вывод, что в клетке L^3T^4 размещается электрическая величина - скорость изменения тока во времени dI/dt , где t – время. Следовательно, возникновение ЭДС при изменении тока в проводнике - это проявление эффекта самоиндукции, открытого Дж. Генри в 1831 году. Величину ЭДС самоиндукции, наводимой в катушке с током (рис.7.1б), можно найти по закону электромагнитной индукции Фарадея

$$E = -L_k \frac{dI}{dt}, \quad (7.2)$$

где L_k – индуктивность катушки. Формула (7.2), записанная для размерностей физических величин, полностью совпадает с формулой (7.1).

Заметим, что на самом деле такой эффект существует, называется он электрокапиллярным. Впервые был обнаружен в следующем опыте. В стеклянный сосуд вливают чистую ртуть и раствор серной кислоты с небольшим количеством двуххромовокалиевой соли. В подобном растворе поверхностное натяжением ртути вследствие её окисления сильно уменьшается, а поэтому капля ртути принимает более плоскую форму. При прикосновении к ртути железного стержня (напр., гвоздя) поверхностное натяжение ртути увеличивается вследствие выделения на её поверхности водорода (железо, ртуть, раствор хромокалиевой соли составляют гальванический элемент); капля принимает более выпуклую форму, быстро отодвигается от гвоздя, снова окисляется и при этом сжимается. Для измерения ЭДС этого гальванического элемента Липпман в 1875 году устроил особый чувствительный электромметр, в котором в сосуд с ртутью был опущен капилляр с той же ртутью. В стенках капилляра были впаяны платиновые проволочки. Одна проволочка располагалась на вершине капилляра, а другая – в глубине капилляра. Выводы проволочек подключались к электроммеру. Таким образом, можно сделать вывод, что эффект самоиндукции и электрокапиллярный эффект имеют глубокую физическую связь.

Передаточная матрица тренда эффектов по размерности совпадает с размерностью индуктивности, поэтому тренд назван индуктивным.

Найдем следующий эффект тренда. Входом эффекта выбираем давление P с размерностью L^2T^{-4} и умножаем его на передаточную матрицу тренда

$$W_7P = \begin{bmatrix} L^{-1} & 0 \\ 0 & T^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^2 & 0 \\ 0 & T^{-4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L^1 & 0 \\ 0 & T^{-2} \end{bmatrix}.$$

В таблице Бартини соответствующая клетка содержит линейное ускорение, в системе СИ имеющее размерность m/s^2 . Ориентируясь на соседнюю клетку справа, в которой размерностью разности потенциалов являются вольты, а сдвиг на клетку влево означает деление на метры, получаем на выходе эффекта величину напряженности электрического поля, измеряемую в В/м. В этих же единицах измеряется электрическая прочность диэлектриков, например, напряжение пробоя $U_{пр}$. Эффект изменения электрической прочности газов в зависимости от давления известен из физики (закон Фр. Пашена, 1889 г.) и более того, его использование рассмотрено Г.С. Альтшуллером в [1] в задаче о молниеотводе (рис.7.1а) для защиты антенн радиотелескопов. Физико-геометрические эффекты индуктивного тренда приведены на рис. 7.2 (красными стрелками).

	L^1	L^2	L^3	L^4	L^5
T^{-4}	Удельный вес Градиент давления	Напряжение Давление	Поверхн. натяжение Скорость тока	Сила	Энергия Момент силы
T^{-3}	Плотность потока	Напряженность эл.-магн. поля	Ток	Импульс	L^5T^{-3}
T^{-2}	Линейное ускорение Электр. прочность	Разность потенциалов ЭДС	Масса Кол-во электричества	Магнитный момент	Момент инерции
T^{-1}	Линейная скорость	Обильность двумерная	Расход объемный	Скорость смещения объема	L^5T^{-1}

Рис.7.2. Физико-геометрические эффекты индуктивного тренда (красные стрелки) и тренда проводимости (синие стрелки)

7.2. Пример нахождения эффектов тренда проводимости

Построим тренд эффектов на основе временного тренда входных воздействий. Выбираем в качестве исходного эффекта явление электроосмоса [4]. Электроосмос – это перемещение жидкости в капилляре под действием приложенной ЭДС. Эффект задается следующим математическим выражением

$$V = \frac{\zeta \varepsilon S}{4\pi\eta\ell} E,$$

где V – линейная скорость жидкости, ζ – дзета-потенциал, E – потенциал внешнего поля, S – сечение капилляра, η – вязкость жидкости, ℓ – расстояние между электродами.

По известным размерностям входа E и выхода V находим передаточную матрицу эффекта

$$W_{8V} = VE^{-1} = \begin{bmatrix} L^1 & 0 \\ 0 & T^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^2 & 0 \\ 0 & T^{-2} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} L^{-1} & 0 \\ 0 & T^1 \end{bmatrix}.$$

Физическая величина в этой клетке таблицы Бартини называется проводимостью (но в системе СИ эта величина имеет размер Ом), поэтому и тренд эффектов назовем трендом проводимости.

Сдвигаемся на шаг вверх, попадаем в клетку напряженности электромагнитного поля H . Находим выход эффекта

$$W_{8H} = \begin{bmatrix} L^{-1} & 0 \\ 0 & T^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^2 & 0 \\ 0 & T^{-3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L^1 & 0 \\ 0 & T^{-2} \end{bmatrix} = a.$$

где a – линейное ускорение.

Такой эффект может быть отнесен к электромагнитному ускорению заряженных частиц, при котором на заряженную частицу, например, в соленоиде, действует сила Лоренца F , зависящая от напряженности электромагнитного поля H . При массе m под действием силы F частица приобретает линейное ускорение $a=F/m$. Этот эффект также используется в электромагнитном оружии, в котором заряженное тело, вылетая из поля, совершает убойное действие [18].

Для следующего эффекта тренда входным воздействием является давление P . Находим выходную величину

$$W_{8P} = \begin{bmatrix} L^{-1} & 0 \\ 0 & T^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^2 & 0 \\ 0 & T^{-4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L^1 & 0 \\ 0 & T^{-3} \end{bmatrix} = j,$$

где j – плотность потока или, применительно к потоку заряженных частиц, плотность тока, измеряемая в системе СИ в A/m^2 . Изменение плотности тока в зависимости от давления газа характерно для газового разряда в электровакуумных приборах [19]. При атмосферном давлении внутри колбы с электродами разряда не возникает, потому что даже при высоком напряжении, разряду не пробить промежуток между электродами. При откачке газа давление падает, и возникает пробой в виде дугового разряда – тонкий малиновый шнур (для воздуха). При дальнейшем снижении давления дуговой разряд переходит в тлеющий, плотность тока растет, разряд занимает всю колбу. Эффекты тренда проводимости представлены на рис. 7.2 синими строками.

7.3. Тренды инвариантов

По результатам примеров в параграфах 7.1. и 7.2. можно сделать следующий вывод. Тренд физических эффектов можно задать его инвариантом, т.е. общей передаточной матрицей W . В законах развития технических систем ТРИЗ эта операция называется свертыванием. Передаточная матрица-инвариант формально совпадает по виду с матрицами физических величин в таблице Бартини. Значит, за каждой клеткой в таблице «скрывается» тот или иной тренд физических эффектов. Каждый эффект, используемый в изобретательской практике, можно пронумеровать по порядку, найти его передаточную матрицу, считать её инвариантом тренда, и поместить номер эффекта в соответствующую клетку инвариантов в таблице. Таким образом, систему LT Бартини можно использовать как средство классификации, кодирования и хранения эффектов, что облегчает их поиск для решения изобретательских задач. На рис. 7.3 приведен фрагмент LT-таблицы, в котором эффекты размещены под порядковыми номерами.

	L^{-2}	L^{-1}	L^0
T^0	14	8,9,10 w_9	
T^1	13	5,6,7 w_8	15
T^2	11,12	1,2,3,4 w_7	

Рис.7.3. Фрагмент LT –таблицы трендов эффектов

В индуктивный тренд с инвариантом W_7 входят следующие эффекты:

1. Эффект Барнетта
2. Прямой пьезоэлектрический эффект
3. Эффект самоиндукции
4. Эффект изменения электрической прочности газов в зависимости от давления.

В тренд проводимости с инвариантом W_8 входят следующие эффекты:

5.Эффект электроосмоса

6. Эффект электромагнитного ускорения

7. Эффект изменения плотности тока в газовом разряде

Кроме того, показаны в качестве примера заполнения таблицы и другие эффекты:

8. Радиометрический эффект проявления силы отталкивания между двумя поверхностями в разреженном газе, имеющими разную температуру, вход – разность температур $L^5 T^{-4}$, выход – сила $L^4 T^{-4}$

9. Эффект Доплера, вход – линейная скорость $L^1 T^{-1}$, выход – частота $L^0 T^{-1}$

10. Механико-геометрический эффект прокатки сляба в лист, вход - объем $L^3 T^0$, выход – поверхность $L^2 T^0$

11.Эффект Дорна (седиментации), вход – сила тяжести (или центробежная сила) $L^4 T^{-4}$, выход – разность потенциалов $L^2 T^{-2}$

12. Закон Фарадея (электромагнитной индукции), вход – сила $L^4 T^{-4}$, выход – ЭДС $L^2 T^{-2}$

13.Тензорезистивный эффект, вход – линейная деформация $L^1 T^0$, выход – электрическое сопротивление $L^{-1} T^1$

14. Закон Гука, вход – сила $L^4 T^{-4}$, выход – механическое напряжение, давление $L^2 T^{-4}$

15. Эффект Доплера, вход - линейная скорость $L^1 T^{-1}$, выход – длина волны $L^1 T^0$.

Главное отличие такого табличного указателя в том, что в нем учитываются некоторые конструктивные особенности технической реализации эффекта. Многие физические эффекты имеют несколько разных входных и выходных воздействий. Например, тензорезистивный эффект (№13) может иметь на входе линейную деформацию, т.е. тензорезистор вытягивается или сжимается по длине, но может быть и пленочным. Для пленочного входом будет давление, и тензоэффект на пленочном тензорезисторе попадет в другую клетку - $L^{-3} T^5$. Аналогично для выходов – эффект Доплера (№9 и №13) размещается в разных клетках в зависимости от того, что получается на выходе доплеровского измерителя скорости, длина волны или частота.

После операции свертывания эффектов в инварианты в виде передаточных матриц, рассмотрим операцию развертывания в тренд уже этих инвариантов. Например, на рис. 7.3 представлен временной тренд такого рода инвариантов $L^{-1} T^0 \rightarrow L^{-1} T^1 \rightarrow L^{-1} T^2$ в зеленой, синей и красной клетках соответственно. Для тренда эффектов в зеленой клетке передаточная матрица W_9 равна

$$W_9 = \begin{bmatrix} L^{-1} & 0 \\ 0 & T^0 \end{bmatrix},$$

а в системе Бартини размерность $L^{-1} T^0$ имеют величины кривизны и изменения проводимости во времени (рис. 4.1). Тренд инвариантов $W_9 \rightarrow W_8 \rightarrow W_7$ или $L^{-1} T^0 \rightarrow L^{-1} T^1 \rightarrow L^{-1} T^2$ может быть представлен электрическим эквивалентом. Если

вместо размерностей в базисе ЛТ подставить условные обозначения элементов электрического контура, то получим следующую цепочку:

$$1/C \rightarrow R \rightarrow L,$$

где C – емкость, Ф, R – электрическое сопротивление, Ом, L – индуктивность, Гн. Для эффектов №№ 1,2,3,4 в индуктивном тренде с инвариантом W_7 индуктивность L является идеальной моделью, отражающей главное свойство преобразования входа в выход. Это свойство заключается в том, что при подаче на вход эффекта потока (или тока – для заряженных частиц) в эффекте возникает некоторая сила, препятствующая изменению этого потока (тока). Энергия взаимодействия не рассеивается, она остается в эффекте. С информационной точки зрения можно сказать, что возникает память, запоминающая это состояние.

Аналогично для эффектов №№ 5,6,7 в тренде проводимости с инвариантом W_8 идеальной моделью является активное омическое сопротивление R . Сопротивление также препятствует входному потоку (или току), но результат не запоминается, так как энергия взаимодействия рассеивается в виде тепла.

Характерный пример – явление электромагнитной индукции, оно используется в эффектах №3 (самоиндукция) и № 6 (электромагнитное ускорение). Пока ток меняется по величине или направлению, свойство индуктивности L сохраняется. Как только ток становится постоянным, свойство индуктивности пропадает, появляется свойство омического сопротивления R , энергия рассеивается при нагреве проводника. Эффект переходит на тренд проводимости. Конечно, пример относится к идеальному проводнику, который обладает или только индуктивностью, или только активным сопротивлением. При электромагнитном ускорении снаряд, вылетающий из орудия, уносит энергию поля, которая рассеивается при трении в полете.

С точки зрения размерностей тренд инвариантов или передаточных матриц эффектов ничем не отличается от тренда пространственных, временных или вещественно-полевых ресурсов, т.е. ресурсных трендов, рассмотренных в главе 4. Для тренда инвариантов тоже можно отыскать инвариант – общее свойство, которое заключается в общем множителе передаточных матриц. Например, для временного тренда инвариантов $W_9 \rightarrow W_8 \rightarrow W_7$ общим множителем будет $L^0 T^1$.

7.4. Анализ тренда эволюции мембраны

Рассмотрим ещё один физический объект, в котором реализуется физико-геометрический эффект, а именно, мембрану (рис.7.4а). Плоская тонкостенная мембрана используется в качестве чувствительного элемента в датчиках давления. Под действием входного давления P , распределенного по поверхности

круглой мембраны с диаметром $2r$, мембрана прогибается. Выходом является максимальный прогиб z центра мембраны.

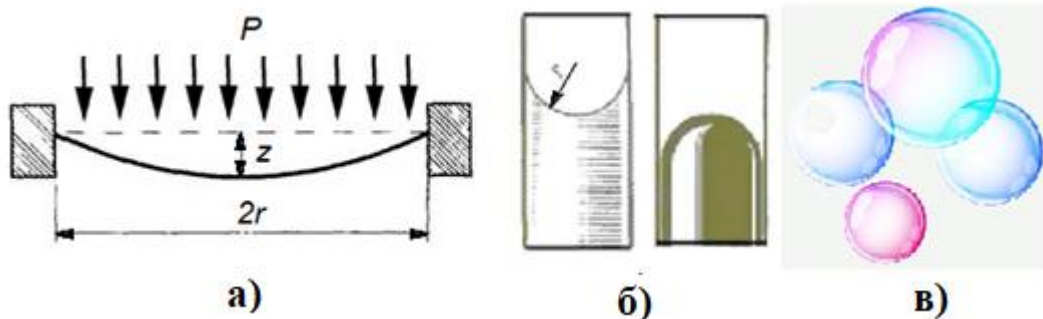


Рис.7.4. Тренд эволюции мембраны: а) металлическая мембрана, б) мениск жидкости в капилляре, в) мыльный пузырь

Найдем передаточную матрицу мембраны

$$W_{10} = z \cdot P^{-1} = \begin{bmatrix} L^1 & 0 \\ 0 & T^0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} L^2 & 0 \\ 0 & T^{-4} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} L^{-1} & 0 \\ 0 & T^4 \end{bmatrix}.$$

Следовательно, передаточная матрица мембраны находится в клетке таблицы Бартини $L^{-1}T^4$. Подадим на передаточную матрицу W_{10} другое входное воздействие – поверхностное натяжение H и найдём выходной результат

$$H \cdot W_{10} = \begin{bmatrix} L^3 & 0 \\ 0 & T^{-4} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} L^{-1} & 0 \\ 0 & T^4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L^2 & 0 \\ 0 & T^0 \end{bmatrix} = S,$$

т.е. выходным результатом является площадь некоторой поверхности. Учитывая, что входным воздействием является сила поверхностного натяжения H , характерная для капиллярных эффектов, то можно предположить, что S – это площадь поверхности мениска смачивающей или не смачивающей жидкости в капилляре (рис.7.4 б). Такова эволюция мембраны от твердого тела к жидкости, за которым стоит инвариант – одна и та же передаточная матрица W_{10} .

Аналогично можно получить выходные результаты физических эффектов при подаче на W_{10} физических величин – градиента давления $grad P$ и силы F , находящихся на одном горизонтальном тренде с давлением P и поверхностным натяжением H :

$$grad P \cdot W_{10} = \begin{bmatrix} L^1 & 0 \\ 0 & T^{-4} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} L^{-1} & 0 \\ 0 & T^4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L^0 & 0 \\ 0 & T^0 \end{bmatrix} = k,$$

$$F \cdot W_{10} = \begin{bmatrix} L^4 & 0 \\ 0 & T^{-4} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} L^{-1} & 0 \\ 0 & T^4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L^3 & 0 \\ 0 & T^0 \end{bmatrix} = V,$$

где k – матрица безразмерных величин, V – матрица объема. Про результат k можно сказать, что он не является результатом физического эффекта, поскольку физического объекта, преобразующего $grad P$ в k , не существует. Он и не нужен, если мы в результате измерений знаем $grad P$, то известны координаты вектора-градиента, которые и задают точку в векторном пространстве, где измерено давление, а длина вектора определяет величину давления. Если все-таки предположить некоторый идеальный физический образ устройства для этого случая, то это была бы мембрана нулевого диаметра и нулевой толщины, математическая точка с размерностью L^0T^0 .

Физический эффект с результатом V (объемом) можно пояснить следующим образом, ориентируясь на предыдущий вход H (поверхностное натяжение) и физический объект – мениск с жидкостью в капилляре. Поверхностное натяжение – это сила натяжения, распределённая по линии контакта границы мениска со стенкой капилляра. Если мы на вход физического эффекта хотим подать силу, мы её должны сосредоточить в точке, т.е. диаметр капилляра устремить к нулю, а силу подавать по оси капилляра. При соответствующем выборе типа жидкости на выходе капилляра получим мыльный пузырь, объем которого V и будет результатом преобразования входной измеряемой силы F (рис.7.4 в). Тренд эволюции физико-геометрических эффектов, инвариантных относительно передаточной матрицы W_{10} представлен в таблице 4. Видно, что геометрически физический объект от эффекта к эффекту развивается по линии: точка \rightarrow твердая тонкая мембрана (профиль как часть окружности) \rightarrow вогнутая (выпуклая) поверхность жидкости \rightarrow жидкостная плёночная мембрана (в объеме мыльного пузыря), что показано на рис. 7.5 сиреневыми стрелками.

Таблица 4. Тренд эволюции физико-геометрических инвариантных эффектов

Физический объект	Входное воздействие	Физический смысл входа	Размерность входа в системе СИ	Размерность входа в ЛТ-системе	Геометрический смысл результата
Математическая точка	Градиент давления	Сила, размазанная по объёму	Па/м	L^1T^{-4}	Точка
Мембрана	Давление	Сила, размазанная по поверхности	Па	L^2T^{-4}	Длина
Мениск жидкости в капилляре	Поверхностное натяжение	Сила, размазанная по линии	Н./м	L^3T^{-2}	Площадь
Мыльный пузырь	Сила	Сила в точке	Н	L^4T^{-4}	Объем

Развитию геометрических свойств соответствует эволюция физических эффектов, представленных коричневыми стрелками на рис. 7.5. Геометрической точке соответствует коричневая стрелка 1. Точка не имеет физического наполнения, поскольку имеет нулевые геометрические размеры. Коричневая стрелка 2 означает эффект, в котором выход задается размерностью линии, причем линия содержит твердую мембрану нулевой толщины, которая и образует геометрический профиль прогиба на рис. 7.4.а (или линейную величину прогиба z в центральной точке мембраны). Коричневая стрелка 2 определяет эффект преобразования давления в мениск (рис.7.4 б), задающий поверхность жидкости в капилляре, а стрелка 4 определяет эффект мыльного пузыря с газом в объеме V . Таким образом, геометрическому тренду линия \rightarrow поверхность \rightarrow объем соответствует физический тренд агрегатных состояний твердое тело \rightarrow жидкость \rightarrow газ.

D.	L^0	L^1	L^2	L^3	L^4	L^5
T^{-4}	$L^0 T^{-4}$	Градиент давления 1	Давление 2	Поверхн. натяжение Скорость тока	Сила 4	Энергия Температура
T^{-3}	$L^0 T^{-3}$	Плотность потока	Напряженность эл.-магн. поля Вязкость	Ток 3	Импульс	$L^5 T^{-3}$
T^{-2}	Угловое ускорение Массовая плотность	Линейное ускорение Электр. прочность	Разность потенциалов ЭДС	Масса Кол-во электричества	Магнитный момент	Момент инерции
T^{-1}	Частота Угловая скорость	Линейная скорость	Обильность двумерная	Расход объемный	Скорость смещения объема	$L^5 T^{-1}$
T^0	Безразмерная величина Константа	Длина Емкость	Поверхность (площадь)	Объем	Момент инерции плоской фигуры	$L^5 T^0$

Рис.7.5. Тренды мембраны в LT- таблице: по коричневым стрелкам – эволюция физических эффектов, по сиреневым стрелкам – эволюция геометрических свойств.

С точки зрения развития технических систем в трендах проявляются следующие законы:

переход на микроуровень - от твердого тела к газу, и повышения уровня организации полей – от поля давления к полям поверхностного и объемного натяжения;

повышение степени подвижности структуры границы, которая и определяется твердой, жидкой и газообразной мембранами.

7.5. Вопросы и задания для самоконтроля по главе 7

1. Что такое тренд эффектов и как его построить в базисе Бартини?
2. Построить тренд эффектов, элементом которого является эффект Доплера
3. Построить тренд эффектов, элементом которого является эффект линейного расширения при нагреве
4. Построить тренд эффектов, элементом которого является эффект Ампера
5. Что такое индуктивный тренд эффектов?
6. Что такое тренд проводимости эффектов?
7. Что такое тренды инвариантов и как они строятся в базисе Бартини?
8. Как строится тренд физико-геометрических эффектов?

Литература

1. Г.С. Альтшуллер. Найти идею. Введение в теорию решения изобретательских задач. – 3-е изд., дополненное. – Петрозаводск: Скандинавия, 2003. – 240 с
2. Ю.В. Горин, В.В. Землянский. Создание новых технических решений на основе использования физических эффектов и явлений. Методическое пособие для преподавателей образовательных учреждений СПО. – Пенза: Пгта, Пку и Пт им. Е. Д. Басулина, 2005. – 60 с
3. Указатель физических эффектов и явлений. С.Денисов, В. Ефимов, В. Зубарев, В.Кустов. Обнинск, 1979 г.
4. Физические эффекты в машиностроении: Справочник / Лукьянец В.А., Алмазова З.И., Бурмистрова Н.П. и др.; Под общ. ред. Лукьянца В.А. – М.: Машиностроение. 1993. – 224 с.
5. Kalevi Rantanen. Eleven Uses of Effects. / The TRIZ Journal, Sep 1998.
6. Б.А.Лабковский. Наука изобретать. – СПб.: Нордмет-Издат, 1999. – 372 с.
7. В. М. Петров. Основы теории решения изобретательских задач. Израиль, Тель-Авив, 2002. <http://triz.natm.ru/articles/petrov/6.2.0.htm>
8. Нить в лабиринте/Сост. А.Б.Селюцкий. - Петрозаводск: Карелия, 1988. - 277 с. - (Техника - молодежь - творчество).
9. Л.И. Седов. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1987. 432 с.
10. А.Б.Бушуев. Применение методов технического творчества в инновационной деятельности – СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. – 124 с.
- 11.Р.Л. Орос ди Бартини, П.Г.Кузнецов. Множественность геометрий и множественность физик. / Сб. «Моделирование динамических систем» Вып. 2. Труды семинара "Кибернетика электроэнергетических систем" Брянск, 1974 г.
- 12.А. Любомирский. Тренд "Точка-Линия-Плоскость-Объем". Доклады Международной конференции «Развитие ТРИЗ: достижения, проблемы, перспективы» MATRIZ Fest 2005, СПб, 2005 г.
13. А.Б.Бушуев. Математика, ТРИЗ, Бартини и кое-что еще...ч.1,2,3. 2007-2008 <https://www.metodolog.ru/01257/01257.html>
- 14.Alexandr V. Bushuev. Physico-Mathematical Resources Search. The TRIZ journal, Jan 2008.
- 15.А.Б. Бушуев. Численная оценка информационно-энергетических схем измерительных устройств // Измерительная техника, № 9, сентябрь.2017. С.3-7.
- 16.А.Б.Бушуев, Ю.В.Литвинов. Функционально-структурное моделирование технических систем. Уч. пособие. СПб: Университет ИТМО, 2019.28 с.

17.Л. Подлипская. К вопросу о трехмерности времени.

<http://ligis.ru/librari/3025.htm>

18.Е.В. Васильев. Пат. РФ № 2324249. Многоступенчатый ускоритель с бегущим переключением соленоидов. Публ. 10.05.2008. Бюл. № 13.

19.Ю. П. Райзер. Физика газового разряда. — 2-е изд. — М.: Наука, 1992. — 536 с.

Бушуев Александр Борисович

Физические эффекты в изобретательских задачах

Учебно-методическое пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО Н. Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверский пр., 49