Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

А. И. Никонов, Об основах операционно-параметрического моделирования, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2005, выпуск 34, 99–118

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu344>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 3.80.181.102

26 апреля 2023 г., 15:39:38

Математическое моделирование

УДК 519.673

А.И. Никонов

ОБ ОСНОВАХ ОПЕРАЦИОННО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассмотрено становление знакового операционно-параметрического моделирования вплоть до его позиционирования как самостоятельной предметной области. Изложены основы теории параметрических моделей, содержащих схемные и математически-описательные составляющие, указаны некоторые области их применения.

Операционно-параметрическое моделирование основывается на совокупном схемно-математическом (графоаналитическом) описании действия технических объектов, которые могут содержать компоненты различной физической природы. Оно используется при анализе и синтезе измерительных систем и устройств. Ниже рассматриваются вопросы эволюционирования операционно-параметрических представлений, позволившего данному графоаналитическому аппарату достичь статуса самостоятельной предметной области, и базовые возможности формирования параметрических моделей.

Физические аналогии. Процессы, явления, совершающиеся как без вмешательства человека, так и в технической сфере, относятся к различным видам физической природы и к их комбинациям. Среди таких различных видов упомянем механический, электрический, магнитный, гидравлический (пневматический), тепловой и присвоим им индексы соответственно m , ε , μ , h , t .

Физическая природа проявляет себя в рамках соответствующей среды, которая занимает ту или иную пространственную область и обладает достаточно определенными свойствами. От них, в свою очередь, зависят тип и уровень результата (отклика), получаемого на выходе указанной среды при воздействии на нее входной физической величины (рис. 1); через α обозначен произвольный, обобщенный элемент множества $\{m, \varepsilon, \mu, h, t\}$.

Замечено, что математизированные представления процессов, характерных для физических сред указанных видов, имеют между собой несомненные черты сходства. Рассмотрению различных вариантов физических аналогий уделено внимание авторами многочисленных научных трудов [1-46]; иногда применение аналогий сопровождается специальными указаниями на базовые соответствия величин различной природы либо сопроводительные упоминания об этих соответствиях отсутствуют.

Дальнейшее использование терминологии обобщенного представления физических сред для определенности привяжем в основном к понятиям, идущим от исследований электрических процессов как одних из наиболее часто реализуемых в технике вообще и наиболее используемых в современных средствах обработки первичной измерительной информации [47]. Участие именно электрической среды по преимуществу реализуется или подразумевается в общей массе случаев выявляемого физического сходства.

На элементарном уровне сходные внутренние свойства различных физических сред отображаются введением обобщенных элементов-аналогов емкостного, резистивного, индуктивного типов с параметрами соответственно емкости (податливости) C_α , активного сопротивления R_α , индуктивности L_α . Каждый из названных элементов отображает некоторую часть α -среды, дробить которую далее нецелесообразно.

Очевидно, существуют параметры, обратные указанным. Это – жесткость $W_\alpha = 1/C_\alpha$, активная проводимость $G_\alpha = 1/R_\alpha$, дедуктивность $D_\alpha = 1/L_\alpha$. Произвольный элемент набора всех названных обобщенных параметров среды обозначим через P_α .

Р и с. 1. Получение результата на выходе среды произвольной природы α

Соединения элементов, относящихся к среде определенной или обобщенной природы, позволяют представить ее в виде цепи данной природы. Наряду с параметрами-аналогами в аппарат анализа физических цепей и процессов вводятся величины воздействия на элементы и величины выходных реакций элементов данной цепи. Любую произвольную величину воздействия или реакции будем обозначать символом v .

При описании физической цепи могут применяться величина-аналог напряжения u_α , ее временной интеграл-потокосцепление, импульс ψ и временная производная u'_α , а также величина-аналог заряд q_α , ее временная производная-ток i_α и временная производная самого тока i'_α .

В изучаемых ниже результатах количественного исследования обобщенной физической цепи используются критерии аналогий как абстрагированных, единообразных математических описаний действия элементов различной природы. Полагается, что параметры типа Π_α , согласно их же определениям, в критериальных выражениях элементарных связей между воздействиями и реакциями выступают коэффициентами пропорциональности. Для упрощения критериальных записей индекс α в сопутствующих им обозначениях опускается, а вводимые индексы типа Π указывают на факты выделения величин в соответствующих элементах физической цепи:

$$q = Cu_C, \quad u_C = Wq, \quad u_R = Ri_R, \quad i_R = Gu_R, \quad \psi = Li_R, \quad i_L = D\psi; q = \int i_C dt, \quad \psi = \int u_L dt,$$

t – время.

Дифференциальная форма данных критериев имеет следующие выражения:

$$\begin{aligned} i_C &= dq/dt = Cu'_C + C'u_C, & u'_C &= du_C/dt = Wi_C + Wq_r; \\ u'_R &= du_R/dt = Ri'_R + R'u_R, & i'_R &= di_R/dt = Gu'_R + G'u_R; \\ u'_L &= d\psi/dt = Li'_L + Li_L, & i'_L &= di_L/dt = Du'_L + D'\psi. \end{aligned}$$

Здесь коэффициентами типа Π' представлены временные производные всех компонентов набора обобщенных параметров с произвольным элементом типа Π .

Операции временного дифференцирования и временного интегрирования величины v , используя операторные коэффициенты p и k_s , будем алгебраизованно изображать соответственно как p_v , $k_s v$. При этом полагаем, что эти операторные коэффициенты определяются следующим образом:

$$p = d(\bullet)/dt, \quad k_s = \int(\bullet)dt;$$

позиции вида $(\bullet)$ отводятся под постановку обозначений преобразуемых величин.

К уже введенным добавим критерии аналогий масштабирования для различных величин обобщенной цепи:

$$q_K = K_q q, \quad u_K = K_u u, \quad i_K = K_i i; u'_K = K_{pi} u', \quad i'_K = K_{pi} i', \quad \psi_K = K_\psi \psi.$$

Постоянные коэффициенты типа K_s , индексы которых определяются используемыми величинами, характеризуют масштабы изменений этих величин. Указанные изменения могут вызываться, в частности, какими-либо внешними по отношению к данной цепи причинами, приводящими к возникновению перепадов воздействий на её элементы.

Полученные критериальные величины, рассматриваемые как произведения, можно сгруппировать по следующим множествам:

$$\begin{aligned} Z_q &= \{Cu_C, k_{si}, q_K\}; \quad Z_u = \{Wq, Ri_R, Li_L, Li, k_{su}, p\psi, u_K\}; \quad Z_i = \{pq, Gu_R, C'u_C, Cu'_C, k_{si}', D\psi, i'_K\}; \\ Z_{pi} &= \{W'q, Wi_C, pu, R'i, Ri', u'_K\}; \quad Z_{pi} = \{Du_L, G'u_R, pi, Gu'_R, D'\psi, i'_K\}; \quad Z_\psi = \{k_{su}, Li_L, \psi_K\}. \end{aligned}$$

Сюда, как видим, вошли и алгебраизированные выражения дифференцирования и интегрирования рассмотренных выше типов.

Совокупность сформированных критериев аналогий в действии выделенных элементов обобщенной цепи, в интегро-дифференциальных взаимосвязях ее величин, в масштабировании величин демонстрирует сходство математических описаний соответствующих преобразований и взаимосвязей для множества цепей с индексами указанного выше видового множества. Сходство физических процессов в цепях указанных видов выявляется и при обращении к более сложным правилам узлов и контуров [22, 30] как обобщений первого и второго законов Кирхгофа.

Ряд аналогий физических величин, действующих в цепях различной природы, приведен в таблице; нумерация некоторых цепей определяется возможностью их вариативного соотношения с набором обобщенных величин-аналогов, содержащим заряд q , напряжение u , ток i , потокосцепление (импульс) ψ .

Критериям аналогий может быть придана безразмерная форма. Это означает, что деление исходно-критериальных компонентов на соответствующие физические единицы дает возможность получить изоморфные критерии с безразмерными величинами, параметрами типов

$$v_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{I[\varepsilon]}, \quad v'_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon'}{I[\varepsilon']}, \quad v_{\Pi} = \frac{\Pi}{I[\Pi]}, \quad v'_{\Pi} = \frac{\Pi'}{I[\Pi']},$$

где $I[\varepsilon]$, $I[\varepsilon']$, $I[\Pi]$, $I[\Pi']$ – единицы величин и параметров соответственно ε , $\varepsilon'=d\varepsilon/dt$, Π , $\Pi'=d\Pi/dt$.

Взаимные соответствия величин различной природы

Физическая цепь – аналог	Величины – аналоги			
	Заряд	Напряжение	Ток	Потокосцепление, импульс
Механическая линейная – 1	Линейное перемещение x	Сила F	Скорость v	Механический импульс p_m
Механическая линейная – 2	Механический импульс p_m	Скорость v	Сила F	Линейное перемещение x
Механическая угловая – 1	Угол поворота φ	Вращающий момент M_F	Угловая скорость ω_m	Момент количества движения M_{mv}
Механическая угловая – 2	Момент количества движения M_{mv}	Угловая скорость ω_m	Вращающий момент M_F	Угол поворота φ
Электрическая	Электрический заряд q_{ε}	Электрическое напряжение u_{ε}	Электрический ток i_{ε}	Потокосцепление ψ_{μ}
Магнитная – 1	Потокосцепление ψ_{μ}	Магнитодвижущая сила u_{μ}	Электрическое напряжение u_{ε}	Электрический заряд q_{ε}
Магнитная – 2	Не рассматривается	Магнитодвижущая сила u_{μ}	Магнитный поток ϕ	Не рассматривается
Тепловая – 1	Энтропия (тепловая) S_T	Разность температур T_T	Скорость изменения энтропии pS_T	Температурный импульс $k_s T_T$
Тепловая – 2	Количество тепла W_T	Разность температур T_T	Разход тепла dW_T/dt	Температурный импульс $k_s T_T$
Гидравлическая, пневманическая	Объём жидкости, газа V_h, V_p	Разность давлений $\Delta p_h, \Delta p_p$	Объёмы расходов pV_h, pV_p	Гидро (пнеumo) импульс $k_s \Delta p_h, k_s \Delta p_p$

Введение нормированного времени $\tau = t/T_0$ с использованием делителя-константы $T_0 \neq 0$, который имеет временную размерность, обуславливает наличие следующей модификации операторных коэффициентов дифференцирования и интегрирования:

$$p_{\tau} = (1/T_0) d(\bullet)/dt = (1/T_0) p = d(\bullet)/d\tau; \\ k_{s\tau} = T_0 \int (\bullet) dt = \int (\bullet) d\tau.$$

Возможен также вариант нормирования критериальных компонентов ε , ε' , Π , Π' при сохранении в математических описаниях цепей размерного времени.

Величина-аналог, реально воздействующая на физическую цепь, выдается источником, способным развивать конечную мощность; реально сама она также имеет конечный уровень. При этом количественное описание действия элементов реактивного характера (индуктивного, емкостного) должно согласовываться с законами коммутации, обобщающими известные электротехнические правила [6, 45]. В соответствии с ними ток-аналог индуктивного элемента и напряжение-аналог емкостного элемента не могут изменяться скачкообразно.

Безразмерные, в общем случае зависимые от времени величины-аналоги и параметры-аналоги, на которые распространяются изложенные правила-ограничения, поддаются распределению по функциональным множествам $M_{v_6}I_\tau$, $M_{v_6}I_t$ либо $M_{v_6}I_t$, $M_{v_{II}}I_t$, где I_τ , I_t – соответственно безразмерный и размерный конечные интервалы действия, наблюдения величин-аналогов [45]. Для постоянных параметров, как общий источник их значений, указывается множество всевозможных действительных чисел.

Переход к множествам с размерными величинами (M_6I_t) и параметрами ($M_{II}I_t$), изоморфным по отношению к $M_{v_6}I_\tau$, $M_{v_{II}}I_\tau$ либо к $M_{v_6}I_t$, $M_{v_{II}}I_t$, выполняется путем умножения элементов типа v_6 , v_{II} на соответствующие физические единицы.

В технике внутри – и межцепных физических преобразований широко распространено использование физических величин-аналогов, синусоидально изменяющихся во времени. Их математическое описание зачастую представляется в комплексной форме [6, 7, 33]. Комплексные изображения гармонических величин-аналогов и времязависимых параметров-аналогов могут быть отнесены ко множествам комплекснозначных функций действительного аргумента – времени [48, 49], а постоянные параметры – к комплекснозначным числовым множествам.

Средства выражения физических аналогий в ходе своего практического использования и совершенствования подверглись значительному влиянию системного подхода.

Системный подход, его применение к модельной схематизации. Система по определению представляет собой множество элементов, образующих единое целое определенного назначения. Противоположность системы – хаотичное нагромождение, немотивированная перестройка чего-то, возможно, весьма невнятного. Любой технический объект, будь он материально-вещественным или информационным, устройством или процессом, является системой и может рассматриваться как таковая.

Естественно, к системам относятся и среда какой-либо единой физической природы, и совокупность различных взаимосвязанных сред, имеющие входы и выходы. Представление системы в виде взаимосотнесенных друг с другом непересекающихся частей (подсистем, модулей, блоков, узлов), каждая из которых объединяет в себе с определенным смыслом, основанием подмножество элементов, выражает структуру данной системы.

При попарном сравнении друг с другом компонентов системы по проявлениям какого-либо заданного признака оказывается, что эти парные проявления совпадают между собой или различаются. Расширение набора сравниваемых системных частей при несовпадении проявлений их одноименного признака создает возможность порядковой расстановки получаемого ряда проявлений согласно какому-либо избираемому критерию ранжирования.

Тем самым в рассмотрение систем и системных частей вводятся значимость оценки того или иного признака и уровень его значимости. Возможная привязка такой оценки к числовому множеству придает ей характер соответственно числовых значений.

Мощным системным средством добывания знаний о реальных объектах является моделирование [50-56]. К построению модели данного объекта можно подходить с материально-вещественной или информационной позиции. Наше внимание будет сосредоточено на информационных, знаковых моделях. Знания, требуемые для реализации необходимых преобразований системных величин, во многом позволяет сформировать, организовать, приспособить к запросам пользователей именно применение знакового моделирования [57]. Знаковые модели могут строиться с привлечением таких понятий, как вход-выход, принцип (способ) действия и параметры состояния системы, любого ее компонента.

Любой компонент системной модели, претендующий на определенность в передаче явления-оригинала, процесса-оригинала, должен обладать системной функцией с собственным характером, порождающим предсказуемую реакцию этого компонента на то или иное входное воздействие. Используемые параметры, переменные состояния моделируемых объектов выражаются значимо, а их свойства имеют различные аспекты. Такого рода знаковые модели могут создаваться, в частности, на основе использования графов или фреймов.

Рассмотрение системного подхода показывает, что им предусматривается проведение исследования, разработки, эксплуатации данного объекта или данного объекта как системы; при этом должно быть обеспечено выполнение требований, предъявляемых к объекту в целом и к его компонентам в отдельности [38, 54-60].

Каждый системный компонент, сама система имеет границы, к которым подходят входные и от которых отходят выходные связи. Выражение действия компонента, системы в целом, основано на использовании соответствующей функциональной зависимости “вход-выход”; каждый вход или выход может быть многомерным. Эта зависимость, называется функцией преоб-

разования [61-63], представляет собой какое-то частное проявление известных закономерностей, исследованных естественными и специальными техническими науками.

Квалифицированные представители какой-либо конкретно-направленной естественнонаучной, технической специальности стремятся ко все более глубокому, непосредственно – близкому отображению указанных закономерностей в соответствующих предметных описаниях. Это приводит, в частности, к построению детализированных принципиальных схем, оставляющих на любом своем участке фактически лишь единственную, хотя бы явно и не начерченную, полосу, линию распространения, преобразования величины-оригинала на данном участке модельного отображения.

Изображения компонентов системных совокупностей физических цепей, выполняемые с рассмотренной позиции, оказываются узкоспециализированными и далекими от подвижек в сторону межпредметного, межприродного обобщения, что в условиях значительного многообразия специфик различных системных частей весьма затрудняет попытки понимания и обзора создаваемых таким образом моделей. Если же обоснованно абстрагироваться от узкоспецифического характера системно-физических описаний, то в модельном представлении действия объектов-оригиналов открывается перспектива использования взаимосвязанных функций преобразования их компонентов вместе со схемными связями между границами компонентов и связями между границами компонентов и внешней средой.

Показ системных связей на указанных границах останавливается, и претензия на узкодетализированное отображение путей преобразования величин по данной совокупности системных компонентов снимается. Тем самым создается возможность получить количественное схематизированное описание-посредник между специфично-подробной детализацией системного состава, действия и общесистемным восприятием данного объекта, отличающимся большей обзорностью и доступностью.

Реальную действенность системного подхода поддерживают его принципы, суть которых выявляется на базе самого определения системы.

1. Принцип целевого приоритета использует определение цели, тесно связанной с назначением объекта-системы; под системной целью понимается конечный результат, который получают, желают получить от действия данной системы. Общесистемная цель безусловно влияет на общую структуру и общее поведение системы.

В создании какого-либо технического объекта первенствует стремление достичь поставленной цели, обеспечить выполнимость его назначения. После постановки цели логичным является обращение к арсеналу имеющихся на текущий период времени средств-кандидатов удовлетворения сформулированной потребности. Достижение системной цели должно быть своевременным.

Обобщение схемы, приведенной на рис. 1, с указанием в рамках ее звена термина “объект” позволяет иллюстрировать ситуацию задания общесистемной цели – желаемого, проявляемого на выходе результата с последующим переходом к поиску структурного, элементного, методического обеспечения создаваемого объекта.

2. Принцип структуризации (структурирования) позволяет, используя определения системы, ее структуры, увидеть в системе и единое целое и совокупность соотнесенных друг с другом компонентов.

Разделение системы на модули-подсистемы, а модулей – на составляющие их блоки, узлы приводит к появлению упорядоченного ряда структурных уровней. С другой стороны, любой объект может рассматриваться как система, скомпонованная из более мелких блоков и, в то же время, – как подсистема старшего по иерархии комплекса – надсистемы.

С системными блоками неразрывно связаны выполняемые ими функции преобразования своих входных величин. Структурная схема, представляющая модульный, блочный состав данного объекта, является его функциональной схемой [64].

Согласно изложенному здесь второму принципу системного подхода, блоки поддаются процедуре укрупнения, сведения их в объединенные модули, а также процедуре разворачивания каждого из них в совокупности взаимосвязанных подблоков, узлов, вплоть до уровня элементов, изображаемых на принципиальных схемах со всей их детализированной спецификой. Любой такой разворачиваемый блок сам может рассматриваться в качестве системы.

3. Принцип функциональности учитывает общность наличия функций преобразования как у отдельных блоков системы, так и у их совокупностей; функции преобразования неразрывно связаны с теми системными компонентами, действие которых они представляют.

Видом функции, оператора преобразования определяется соответствие между входной и выходной величинами (v_i, v_{oi}) какого-либо i -того блока объекта:

$$f_i: v_i \rightarrow v_{oi}; \quad v_i \in B_{vxi}, \quad v_{oi} \in B_{vixi},$$

где B_{vxi}, B_{vixi} – множества допустимых значений соответственно входных и выходных величин i -того блока.

Основная функция “вход-выход системы” может быть разделена на составляющие (вспомогательные функции), относимые к выделяемым в структуре объекта соответствующим системным модулям. Структурные схемы, представляющие взаимодействия, процессы, операции, реализуемые системными блоками, называют операционными.

Функция преобразования системного компонента или самой системы характеризуется формой выражения [65], которая указывает на правило обращения данного компонента или системы f (рис. 2) со входной величиной-переменной v , использующее совокупность параметров Π . Их значимые уровни в рамках заданного правила определяют получаемый количественный результат.

Р и с. 2. Операция функционального преобразования системного компонента или системы в целом

На рис. 2 позиция (*) отводится под символ v , а индекс блока, реализующего операцию f , для упрощения не указан.

Обозначения, позиции параметров вместе с символами, позициями операций – составляющих f и создают форму, выражающую преобразование входной величины. Примерами параметров как математических объектов являются величины – слагаемые, множители, делители из алгебраических выражений.

4. Принцип развития может затрагивать, с одной стороны, изменения ситуации, связанной с действием, состояниями данной системы, а с другой – совершенствование, модернизацию системы данного типа; именно системное совершенствование и рассматривается ниже.

Соответствие объекта – системы своему назначению, получению желаемого результата выполняется тем более успешно, чем совершеннее этот объект, тем лучше оказываются его показатели, интересующие пользователя. К развитию относят, в частности, улучшения характеристик отдельных системных компонентов, замену какого-либо системного модуля, блока на модернизированный, подключение новых компонентов, изменение связей системы, улучшающее ее показатели. Использование принципа развития сопутствует поиску новых технических решений, повышению творческой активности их разработчиков и пользователей.

В достаточно общем виде полезное и, возможно, новое изменение исходного объекта может быть отражено с помощью оператора развития [57, 66]. Концепция формирования этого оператора предполагает, что его образует совокупность модельного описания исходного объекта, затем – правил, процедур совершенствования и, наконец, модельного описания объекта, полученного в результате улучшения.

В рамках применимости оператора развития изменениям могут подвергаться компоненты исходного объекта, взаимосвязи между ними, а итоги результирующего изменения в свою очередь могут быть отнесены к тому надобъекту – надсистеме, которому данный объект – система принадлежит как одна из составных частей.

Изложенные принципы использованы в обосновании разработки аппарата, дающего графоаналитическое представление физических цепей непрерывного и дискретного действия, а также различных межцепных зависимостей.

Сращивание средств системотехники и критериального представления аналогий во многом было обусловлено наличием большой практической потребности в обеспечении информационно-измерительных и управляющих систем измерительными преобразователями различного назначения, отвечающими комплексам все более варьируемых требований. Результатом решения задач, относящихся к удовлетворению ряда проявлений указанной потребности, стало появление знаково-модельных средств, отображающих процессы восприятия и переработки измерительной информации, взаимосвязи используемых при этом физических величин с помощью параметрических схем и соответствующих математических описаний.

Развитие рассматриваемых средств знакового моделирования отмечено фактами связывания материалов аналитического и табличного характера, отражающих взаимосвязи величин–аналогов [9, 11, 13, 16-17, 24, 26, 67-68] со структурными схемами операционной направленности [21-23, 25, 27-28, 30, 32-34, 37-46, 69-72].

Данные модельные средства, эволюционируя от исходной позиции структурного приложения физических аналогий, достигли теперь положения более широкой и самостоятельной

предметной области операционно-параметрического моделирования. Параметрические схемы продемонстрировали возможности наглядно и, вместе с тем, достаточно точно отражать разнообразные ситуации системно-физических преобразований.

Этот графоаналитический аппарат оказался также способным сосредотачивать внимание заинтересованного пользователя именно на тех узлах объекта-оригинала, характеристики которых оказывают наиболее критичное влияние на решение задачи какого-либо его конкретного изменения, усовершенствования.

Общие аспекты параметрических моделей, однозвенные отображения системно-физических аналогий. Операционно-параметрическая схема – это совокупность звеньев, связанных между собой и с областью, представляющую окружающую среду, по входам и выходам, причем каждое звено выражает определенную функцию, оператор преобразования входа соответствующего системного компонента и форма такого выражения включает в себя необходимые параметры, операторные коэффициенты. Каждое звено инцидентно дугам, представляющим его входные и выходные величины.

Преобразователи физических величин отображаются на параметрической схеме в виде совокупностей операционных звеньев, реализующих элементарные или модульные составляющие общесистемных функций преобразования. Схематически операционные звенья изображаются в основном как прямоугольники. Фактическое суммирование величин, осуществляемое в цепи естественным образом, может представляться на схеме подводом изображений величин, с указанием их знаков, к отрезку прямой. Совокупность параметров данного системного компонента, обозначаемую через Π , рассматриваем теперь в общем случае как многомерную величину. В обозначениях природы двух различных по виду цепей используем индексы (α, λ) .

Функциональное преобразование заданного системного компонента, сопровождающееся наличием отклонений его выходной величины e_α от своих номинальных значений, схемно-параметрически отражено на рис. 3.

Р и с. 3. Изображение номинального (а) и реального (б) функционального преобразования величины

В отличие от номинального, предписанного преобразования входной величины e , производимого с использованием набора номинальных параметров Π^n и с получением номинального же результата e_α^n (рис. 3,а), реальное преобразование (рис. 3,б) характеризуется использованием совокупности параметров, состоящей из элементов типа $\Pi_i = \Pi_i^n + \Delta\Pi_i$, где Π_i^n - i -тый элемент параметрического набора Π^n ; $\Delta\Pi_i$ – отклонение i -того параметра от своего номинального значения, которое можно рассматривать как соответствующий элемент вектора параметрических отклонений $\Delta\Pi$.

Выражение погрешности результата данного преобразования имеет вид

$$\Delta e_\alpha = e_\alpha - e_\alpha^n = f(e, \Pi) - f(e, \Pi^n).$$

Если отклонения результата преобразования e_α от заданных значений относительно невелики, то ее приращение – погрешность оценивают по выражению дифференциалов аргументов и полного дифференциала функции [73] с использованием в этом выражении конечных приращений аргументом и самой функции; такая оценка достаточно широко распространена в технике [28, 38, 61, 74]. Оправданность применения этой оценочной методики объяснима, в частности, тем, что технические объекты, предназначенные для реальной эксплуатации имеют лишь допустимо – небольшие отклонения реальных результатов своего действия от заданных.

Параметрическое выделение погрешности преобразования на основе полного дифференциала выходной величины системного компонента e_α , рассматриваемой при заданном номинальном значении входа $e = e^n$ как функция параметрической совокупности Π , показана на рис. 4. Через f_n' обозначен вектор частных производных функции $f(e^n, \Pi)$ по аргументам типа Π_i , располагаемых в порядке возрастания индекса i ; верхний индекс T – символ транспонирования (вектора-строки $\Delta\Pi$).

Здесь оценка погрешности преобразования $e \rightarrow e_\alpha$ имеет вид

$$\Delta \epsilon_s = (\partial f(\epsilon^n, \Pi) / \partial \Pi) \Delta \Pi^T.$$

Свободное место, оставляемое на схемах (рис. 3,б и рис. 4) возле полей типа $\Delta \Pi$, позволяет

Р и с. 4. Изображение функционального преобразования с выделением приращения выхода в виде полного дифференциала

при необходимости, выделив составляющие $\Delta \Pi$, в том числе зависящие от величин другой природы, к изображениям этих составляющих подводить связи от влияющих величин.

Схемы алгебраических операций, выполняемые в объектах-оригиналах специально предназначенными для этого устройствами, блоками для пользователя параметрических моделей (как системотехника)

представляются звеньями, в контуры которых вносятся обозначения конкретных операционных видов, например, суммирования или умножения.

Гармонически изменяющаяся во времени величина в операционно-параметрических схемах может быть представлена комплексным изображением, следующим за соответствующим символом $\frac{\cdot}{\cdot}$. Обратному переводу в область временных функций сопутствует символ $\frac{\cdot}{\cdot}$. Комплексное изображение в параметрических схемах дифференцирования по времени и временно-го интегрирования каких-либо гармонических величин, изменяющихся с круговой частотой ω , предусматривает использование звеньев типов “ $j\omega$ ”, “ $1/(j\omega)$ ”; $j = \sqrt{-1}$.

Рассмотрим более подробно однозвенные операционно-модельные структуры, отображающие критерии аналогий для попарных взаимосвязей величин-аналогов.

Звено, показанное на рис. 5,а, отображает произведение входной величины ϵ и постоянно-го параметра Π_c элемента цепи, выходная величина которого имеет вид

$$\epsilon_{св} = \Pi_c \epsilon, \quad \Pi_c = \text{const.}$$

Р и с. 5. Изображение действия элементов с постоянным (а) и переменным (б) параметрами

Если на элемент с изменяющимся во времени параметром $\tilde{\Pi}$ подается постоянная величина ϵ_c , то действие этого элемента представляется звеном (рис. 5,б) с выходной величиной

$$\epsilon_{св} = \epsilon_c \tilde{\Pi}, \quad \epsilon_c = \text{const.}$$

На рис. 6 показаны параметрические звенья, отображающие следующие случаи преобразования величины ϵ_α из цепи одной физической природы в параметр $\tilde{\Pi}_\lambda$ (а) либо величину ϵ_λ (б) иной природы:

$$\tilde{\Pi}_\lambda = k_{\alpha\tilde{\Pi}\lambda} \epsilon_\alpha, \quad \epsilon_{\lambdaс} = k_{\alpha\epsilon\lambda} \epsilon_\alpha.$$

Р и с. 6. Изображение межцепных преобразований “величина-параметр” (а) и “величина-величина” (б)

Здесь $k_{\alpha\tilde{\Pi}\lambda}$, $k_{\alpha\epsilon\lambda}$ – коэффициенты межцепных преобразований (зависимостей) соответственно $\epsilon_\alpha \rightarrow \tilde{\Pi}_\lambda$ и $\epsilon_\alpha \rightarrow \epsilon_{\lambdaс}$. Значения коэффициентов межцепных зависимостей определяются на основании количественных описаний физических эффектов.

После реализации преобразования $\epsilon_\alpha \rightarrow \tilde{\Pi}_\lambda$ на элемент с параметром $\tilde{\Pi}_\lambda$ может быть подана постоянная величина $\epsilon_\lambda = \epsilon_{\lambdaс}$ и получена результирующая величина

$$\epsilon_{\lambda\epsilon} = \epsilon_{\lambda c} \tilde{P}_{\lambda} = \epsilon_{\lambda c} k_{a\pi\lambda} \epsilon_a.$$

На рис. 7 изображены модельные звенья временного дифференцирования (а) и временного интегрирования (б) величины ϵ , реализующие операции соответственно

$$\epsilon_{ep} = d\epsilon/dt, \epsilon_{es} = \int \epsilon dt.$$

Р и с. 7. Дифференцирующее (а) и интегрирующее (б) звенья

Погрешности преобразования “вход-выход” параметрических элементов однозвенных типов (рис. 5-6), вызываемые отклонениями параметров-коэффициентов пропорциональности P_c , ϵ_c , $k_{a\pi\lambda}$, $k_{a\epsilon\lambda}$ от своих номинальных значений P_c^H , ϵ_c^H , $k_{a\pi\lambda}^H$, $k_{a\epsilon\lambda}^H$, в общем виде выражаются следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta\epsilon_{ec} &= \Delta P_{ec} + \Delta\epsilon_{eco}, \Delta P_c = P_c - P_c^H; \Delta\epsilon_{ev} = \Delta\epsilon_c \tilde{P}_{\lambda} + \Delta\epsilon_{evo}, \Delta\epsilon_c = \epsilon_c - \epsilon_c^H; \\ \Delta\tilde{P}_{\lambda} &= \Delta k_{a\pi\lambda} \epsilon_a + \Delta\tilde{P}_{\lambda 0}, \Delta k_{a\pi\lambda} = k_{a\pi\lambda} - k_{a\pi\lambda}^H; \\ \Delta\epsilon_{\lambda\epsilon} &= \Delta k_{a\epsilon\lambda} \epsilon_a + \Delta\epsilon_{\lambda\epsilon 0}, \Delta k_{a\epsilon\lambda} = k_{a\epsilon\lambda} - k_{a\epsilon\lambda}^H. \end{aligned}$$

Здесь символами $\Delta\epsilon_{eco}$, $\Delta\epsilon_{evo}$, $\Delta\tilde{P}_{\lambda 0}$, $\Delta\epsilon_{\lambda\epsilon 0}$ обозначены аддитивные составляющие погрешностей.

Неидеальность инструментального воспроизведения операций дифференцирования и интегрирования также может иметь модельное представление, выражаемое появлением ненормальных сомножителей операторных коэффициентов и добавок аддитивного характера к результатам этих операций.

Совокупности разнообразных по типам параметров, коэффициентов преобразований содержат операционно-параметрические сети; звенья сети и инцидентные им дуги графически выражают операции, в общем виде представленные на рис. 5 и рис. 7. Сеть данного вида может, в частности, отображать связи некоторых величин, участвующих в однократных преобразованиях-аналогах, которые в большей степени, нежели другие, используются соответствующими критериями аналогий [46].

Внутрицепные взаимодействия достаточно широкого круга системно-физических величин отображает операционно-параметрическая сеть, показанная на рис. 8; ее связи затрагивают все величины, фигурирующие в рассмотренном наборе аналогий однократных преобразований. Здесь через P_{iu} , P_{ui} , P_{pi} , P_{ip} обозначены произвольные элементы параметрических множеств соответственно

$$\begin{aligned} M_{P_{iu}} &= \{R, L\}, M_{P_{ui}} = \{G, C\}; \\ M_{P_{pi}} &= \{W, R\}, M_{P_{ip}} = \{D, G\}. \end{aligned}$$

Дуги, подходящие к сетевым шинам q_{π} , u_{π} , i_{π} , u'_{π} , i'_{π} , ψ_{π} , отображают элементы введенных выше множеств соответственно Z_q , Z_u , Z_i , Z_{pu} , Z_{pi} , Z_{ψ} . Сами же данные шины, в свою очередь, отображают операции возможного суммирования, а в частных случаях – выбора компонентов из совокупностей вида Z :

$$(\forall Z_{\epsilon} \subset Z_{\epsilon}) \sum_{Z_{\epsilon}} \epsilon_z, \epsilon_z \in Z_{\epsilon},$$

Z_{ϵ} , Z_{ϵ} – произвольный вид любого из множеств Z_q , Z_u , Z_i , Z_{pu} , Z_{pi} и любого непустого подмножества множества Z_{ϵ} .

В частности, возможности операционно-сетевого суммирования или выбора величин, входящих в множество вида Z_{ϵ} с элементами-напряжениями, токами, временными производными напряжений и временными производными токов, могут быть представлены соответственно как

$$(\forall Z_u \subset Z_u) \sum_{Z_u} u_z, (\forall Z_i \subset Z_i) \sum_{Z_i} i_z, (\forall Z'_u \subset Z'_u) \sum_{Z'_u} u'_z, (\forall Z'_i \subset Z'_i) \sum_{Z'_i} i'_z,$$

Р и с. 8. Операционно – параметрическая сеть для изображения однократных преобразований шести величин – аналогов

где Z_u, Z_i, Z'_u, Z'_i – непустые произвольные подмножества множеств Z_u, Z_i, Z'_u, Z'_i соответственно; u_Z, i_Z, u'_Z, i'_Z – произвольные элементы множеств Z_u, Z_i, Z'_u, Z'_i .

Формирование наборов результатов однократных модельных преобразований, предназначенных для использования в анализе и синтезе технических объектов, производится с учетом условий допустимости такого использования. При этом, в частности, возможен учет условий реализации операций временного дифференцирования и временного интегрирования только при участии в них определенных параметров.

Последовательности ряда операций, каждая из которых представлена операционно-параметрической сетью, соответствующей исходным критериям физических аналогий, могут быть схематично изображены в результате неоднократного применения данной параметрической сети.

Параметрические модели операционных совокупностей. Обозначив общее количество компонентов, берущихся для построения какого-либо исследуемого системного модуля или объекта, через m_e , рассмотрим типовые случаи параметрического отображения выходных величин-результатов проведения конечного ряда последовательных преобразований входов.

Для последовательного соединения элементов единой физической природы, когда вход каждого последующего элемента не оказывает влияния на выход предыдущего (параметрическая модель – на рис. 9,а), выходная величина такого системного модуля определяется произведением

$$\sigma_e = \left(\prod_{i=1}^{m_e} P_i \right) \sigma,$$

где P_i – параметр произвольного i -того элемента.

Если же физический вид величины, действующей на выходе последовательно включенных системных элементов изменяется (параметрическая модель – на рис. 9,б), то результирующая величина преобразования определится как

$$\theta_{\lambda e1} = \left(\prod_{i=1}^{l_e-1} \Pi_{\alpha i} \right) k_{\alpha \Pi \lambda} \theta_{\lambda c} \left(\prod_{i=l_e+1}^{m_e} \Pi_{\lambda i} \right) \theta_{\alpha}$$

либо как

$$\theta_{\lambda e2} = \left(\prod_{i=1}^{l_e-1} \Pi_{\alpha i} \right) k_{\alpha \theta \lambda} \left(\prod_{i=l_e+1}^{m_e} \Pi_{\lambda i} \right) \theta_{\alpha},$$

где l_e – индекс элемента, реализующего межцепную зависимость с коэффициентом $k_{\alpha \Pi \lambda}$ или $k_{\alpha \theta \lambda}$.

Р и с. 9. Изображение последовательно включенных элементов без влияния последующих на предыдущие при сохранении (а) и изменении (б) результатом природы входной величины

Параллельное соединение конечного числа цепных элементов, обеспечивающее алгебраическое суммирование их одноименных выходных величин, отображено параметрической схемой на рис. 10,а. Выходная величина этого соединения выражается как

$$\theta_{\theta \Sigma} = \left(\sum_{i=1}^{m_e} \Pi_i \right) \theta.$$

В варианте параллельного соединения элементов, предусматривающем раздельное использование их выходных величин (параметрическая модель – на рис. 10,б), каждая из них имеет вид

$$\theta_{\theta i} = \Pi_i \theta, \quad i=1, \dots, m_e.$$

Р и с. 10. Изображение параллельно включенных элементов, имеющих общие входы, с суммированием (а) и разобщением (б) результатов частных преобразований

Формы параметрических схем, отображающих совокупности элементов с разобщенными входами и алгебраическим суммированием выходов, представлены на рис. 8 совокупностями звеньев, связанными с определенными сетевыми шинами. Суммирование выходных величин отдельных элементов, осуществляемое в рамках данного преобразования, отображается выражениями вида

$$\theta_{\Pi \Sigma j} = \sum_{i=1}^{m_{zj}} \theta_{\Pi i} = \sum_{i=1}^{m_{zj}} \Pi_i \theta_i, \quad m_{zj} = m_z \in \{1, \dots, m_z\},$$

причем в качестве коэффициента Π_i здесь может использоваться параметр цепного элемента или операционный коэффициент; m_z – число элементов подмножества типа Z , пронумерованных (по отношению к индексации элементов из множества Z) в порядке последовательного возрастания; m_z – число составляющих множества типа Z ; индекс j соответствует варианту совокупности параметров данного модельного участка, используемых в выражении суммирования заданных величин.

В связи с потребностью проведения алгебраического суммирования выходов ряда элементов возникают следующие типы задач нахождения системных величин: исходно известны m_z входных величин, и требуется найти выходную величину θ_{Σ} (прямая задача); исходно известна выходная величина $\theta_{\Sigma} = \theta_z$, и требуется определить входные величины (обратная задача) [75].

Вариант параметрического отображения двух исходно заданных величин θ_1, θ_2 и вариант, параметрически отображающий исходное задание величины θ_3 при суммировании также двух величин, представлены на рис. 11; Π_1, Π_2 – цепные параметры.

Р и с. 11. Варианты параметрического представления режимов задания двух входных величин (а) и выходной величины (б)

Для прямой задачи описание подпроцесса на выделенном системном участке имеет вид формирования суммы

$$\theta_\Sigma = \theta_{\Pi 1} + \dots + \theta_{\Pi m}$$

как результата данного подпроцесса.

В отношении обратной задачи описание аналогично назначению сводится к уравнению

$$\theta_{\Pi 1} + \dots + \theta_{\Pi m} = \theta_3,$$

требующему определения величин вида θ_i , входящих сомножителями в компоненты его левой части. Взаимоотношения искомых величин выражаются, исходя из самих критериев аналогий, которые, в свою очередь, берутся за основу построения операционно-параметрических сетей.

Потребность в параметрическом отображении алгебраических комбинаций результатов параллельно протекающих подпроцессов с рассмотренным сложением выходов участвующих в них элементов может быть удовлетворена за счет связей необходимого числа фрагментов операционной сети, представляющих данные подпроцессы, со схемно-параметрическими средствами взвешенного суммирования.

Принципиальная схема продольно-поперечного соединения системных элементов [30, 44, 72], которую можно рассматривать как изображение последовательно включенных параметрических каскадов-четырёхполюсников и двухполюсника с нагрузкой, изображена на рис. 12, а. Введем следующие обозначения: $Z_{k\xi}$ ($\xi = 1, 2$), Y_k – элементы продольного и поперечного типов с параметрами соответственно $z_k = z, y_k$, причем через k обозначены индексы, берущиеся из множества $K_{II} = \overline{1, n}$ для элементов типа Z и из множества $K_{IIO} = \overline{0, n-1}$ для элементов типа Y ; n – число каскадов физической цепи без учета нагрузки и смежных ей частей элементов Z_{11}, Z_{12}

$$y_k = \begin{cases} y : k \neq m_{II}; \\ y_m : k = m_{II}, \end{cases}$$

где m – индекс параметра поперечного элемента, возможно находящегося под действием величины, внешней по отношению к рассматриваемой цепи; u_k, i_k ($k \in K_{II}$) – величины воздействия и реакции, выделяемые на выходе каждого k -того четырехполюсника, границы которого определяются центрами смежных продольных элементов; u_{ex} – величина входного воздействия. Учет текущего значения y_m может быть связан, в частности, с необходимостью выполнить измерительное преобразование координат источника внешнего воздействия.

Р и с. 12. Принципиальная схема (а) и модельная ячейка с параметром $y_{ex eq}$ (б) для цепи последовательно включенных параметрических каскадов

Анализ данной принципиальной схемы, выполненный с применением обобщенных законов Кирхгофа [30, 44, 67, 72], показывает, что её входной параметр поперечного типа, эквивалентный параметрической совокупности ряда определённых схемных элементов, может быть представлен в виде:

$$y_{ex\ eq} = \frac{i_{ex}}{u_{ex}} = \frac{1}{z(\beta_{n-1} + 1)}, \quad i_{ex} = i_n; \quad \beta_{n-1} = \beta_k|_{n-1}, \quad \beta_k = \frac{(1 + K_k)(\beta_{k-1} + 1) + 1}{K_k(\beta_{k-1} + 1) + 1};$$

$$K_k = zy_k, \quad k \in K_{II0} \cap K_{II1}; \quad \beta_0 = (1 + K_0)/K_0, \quad K_0 = zy_0;$$

введённые вспомогательные параметры типа β названы шаговыми [67].

Распределение величин воздействий и реакций исследуемой цепи выражается следующим образом:

$$i_n = \frac{u_{ex}}{z(\beta_{n-1} + 1)}, \quad u_n = \frac{\beta_{n-1}}{\beta_{n-1} + 1} u_{ex};$$

$$i_k = \frac{\beta_k - 1}{\beta_{k-1} + 1} i_{k+1}, \quad u_k = z\beta_{k-1} i_k, \quad k \in K_{II0} \cap K_{II1}.$$

Параметрическая схема формирования величины i_{ex} показана на рис. 12,б.

Формирование последовательности воздействий и реакций в многокаскадной цепи с продольными и поперечными элементами отражено на рис. 13,а; z_{keq} , y_{keq} - эквивалентные параметры, связанные с представлением элементов соответственно продольного и поперечного типов для части цепи, содержащей нагрузку Y_0 и четырёхполюсники, индексируемые от первого до k -того включительно.

Р и с. 13. Фрагменты структур, представляющих чередование воздействий и реакций (а), а также связь смежных воздействий (б)

Определение указанных эквивалентных параметров производится с использованием следующих выражений:

$$z_{ke} = z\beta_{k-2}(\beta_{k-1} - 1)/(\beta_{k-2} + 1), \quad k \in K_{III} \setminus \{1\};$$

$$y_{ke} = 1/(z\beta_{k-1}), \quad k \in K_{III}.$$

Более укрупненно соответствие $u_k \rightarrow u_{k-1}$ можно представить, вводя безразмерный параметр – коэффициент преобразования

$$k_{k,k-1} = \frac{u_{k-1}}{u_k} = \frac{\beta_{k-2}}{\beta_{k-1}} \cdot \frac{\beta_{k-2} + 1}{\beta_{k-1} - 1}.$$

Параметрическое звено, отображающее данный коэффициент, показано на рис. 13,б.

Нагрузочный элемент Y_0 выделяет величину

$$u_0 = u_1 - i_1 z = z(\beta_0 - 1)i_1 = z(\beta_0 - 1)i_n \prod_{j=k}^{n-1} \frac{\beta_j - 1}{\beta_{j-1} + 1} = k_{ex,0} u_{ex},$$

$$\text{где } k_{ex,0} = \frac{\beta_0 - 1}{\beta_{n-1} + 1} \prod_{j=k}^{n-1} \frac{\beta_j - 1}{\beta_{j-1} + 1}.$$

С позиций применения аппарата анализа дискретно распределенной физической цепи оказывается возможным исследовать также модели двух распределенных подобным образом и, в свою очередь, последовательно связанных между собой, цепей различной природы [44]. Будем отмечать величины, параметры данных цепей соответствующими верхними индексами 1 (α -цепь) и 2 (λ -цепь).

Величина u_0^1 , выделяемая в нагрузке первой цепи и входная величина второй цепи u_{ex}^2 могут быть связаны между собой посредством физико-технического эффекта типа “величина α -цепи – величина λ -цепи” или типа “величина α -цепи – параметр λ -цепи” с коэффициентами межцепных зависимостей соответственно $k_{I\alpha 2}$ и k_{III2} .

Отмечая теперь величины и параметры, относящиеся к указанным вариантам межцепного перехода нижними индексами соответственно 1 и 2, имеем

$$u_{ex1}^2 = k_{1\theta 2} k_{ex,01} u_{ex1}^1, \quad u_{ex2}^2 = u_c^2 k_{1\Pi 2} k_{ex,02} u_{ex2}^1,$$

где u_c^2 – постоянная величина, подаваемая на элемент с параметром

$$\tilde{\Pi}_{ex}^2 = k_{1\Pi 2} u_{02}^1;$$

данные величина и параметр, как показывает их индексация, относятся к λ -цепи.

Операционно-параметрические схемы системного преобразования от входа первой цепи ко входу второй цепи с использованием двух вариантов (1, 2) межцепного перехода изображены на рис. 14.

Р и с. 14. Схемы преобразования “первый вход-второй вход” двух последовательно связанных распределенных цепей с межцепными переходами типов “величина-величина” (а) и “величина-параметр” (б)

Ко всем рассмотренным типам последовательных и параллельных соединений системных компонентов вполне применимо замечание о многократности модельного прохождения операционной сети используемыми в данных моделях типовыми величинами при возникновении потребности в параметрическом отображении совокупностей системно-физических операций.

Параметрические модели непрерывно-дискретного преобразования. Действие системных блоков, дискретно изменяющих уровни своих выходных величин по достижении их входами определенных пороговых, граничных значений, также отображается параметрическими схемами, в частности, релейными звеньями, а также звеньями квантования и временной дискретизации. Полагаем, что по физической природе величины входа и выхода данного блока в общем случае могут не совпадать между собой, поэтому ниже они индексируются различными символами [28, 30, 71].

На рис. 15 показаны параметрические изображения релейных блоков со скачкообразными изменениями выходной величины (а) и параметра (б). При описании их действия используется функция Хевисайда [76] в асимметричной модификации:

$$1(x) = 1_+(x) = \begin{cases} 0 : x \leq 0, \\ 1 : x > 0, \end{cases}$$

где x – действительный аргумент.

Р и с. 15. Параметрические релейные структуры, отображающие формирование величины (а) и параметра (б)

Выходы рассматриваемых релейных звеньев имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} e_{\lambda\theta}^d &= e_{\lambda\theta}^{sg} = k_{\alpha\theta\lambda}^{sg} (e_a - e_{ar}), & k_{\alpha\theta\lambda}^{sg} &= e_{\lambda\theta} k_{\alpha\theta\lambda}^{sg}; \\ \Pi_{\lambda}^d &= \Pi_{\lambda}^{sg} = k_{\alpha\Pi\lambda}^{sg} (e_a - e_{ar}), & k_{\alpha\Pi\lambda}^{sg} &= \Pi_{\lambda} k_{\alpha\Pi\lambda}^{sg}; \\ k^{sg} &= 1(\bullet), & e_{\lambda\theta} &= const, & \Pi_{\lambda} &= const; \end{aligned}$$

$\epsilon_{\text{ог}}$ – граничное, пороговое значение величины ϵ_{α} , достижение которой вызывает скачкообразное изменение выхода соответствующего элемента; верхним индексом d отмечается именно дискретный характер изменения величин, параметров.

Многоступенчатое преобразование входа с общим числом граничных уровней n_r представляется суммой дискретных приращений величины

$$\epsilon_{\lambda\epsilon}^d = \epsilon_{\lambda\Sigma}^{sg} = \sum_{i=1}^{n_r} k_{\alpha\epsilon\lambda i} (\epsilon_{\alpha} - \epsilon_{\alpha i})$$

и параметра

$$\Pi_{\lambda}^d = \Pi_{\lambda\Sigma}^{sg} = \sum_{i=1}^{n_r} k_{\alpha\Pi\lambda i} (\epsilon_{\alpha} - \epsilon_{\alpha i}),$$

причем

$$k_{\alpha\epsilon\lambda i} = \epsilon_{\alpha i} k_{\lambda\Sigma}^{sg}, \quad k_{\alpha\Pi\lambda i} = \Pi_{\lambda i} k_{\lambda\Sigma}^{sg};$$

$$\epsilon_{\lambda i} = \text{const}, \quad \Pi_{\lambda i} = \text{const}.$$

Параметрическое описание операции равномерного квантования производится с выделением целой части числа [28, 30, 44, 71]; такое выделение представляется соответствующей функцией аргумента x и выражается как $[x]$.

Первый вариант параметрического отображения равномерного квантования величины ϵ_{α} предполагает перевод выходной величины ϵ_{λ}^d на нижний разрешенный уровень, соответствующий ближайшему текущему значению ϵ_{α} . В рамках данного варианта выходная величина звена, которое изображает квантователь (рис. 16,а), имеет вид

$$\epsilon_{\lambda}^d = \epsilon_{\lambda 0}^q = k_{\alpha\epsilon\lambda}^q \epsilon_{\alpha}; \quad k_{\alpha\epsilon\lambda}^q = \Delta\epsilon_{\lambda\epsilon} [\cdot / \Delta\hat{\epsilon}_{\alpha q}];$$

$\Delta\epsilon_{\alpha q}, \Delta\epsilon_{\lambda\epsilon} = k_{\alpha\epsilon\lambda} \Delta\epsilon_{\alpha q}$ – шаги квантования величин, действующих соответственно в α – и λ -цепях.

Формирование выходного дискретно меняющегося параметра системного блока, реализующего первый вариант равномерного квантования и отображаемое схемой, показанной на рис. 16,б, выражается как

$$\Pi_{\lambda}^{\alpha} = \Pi_{\lambda 0}^q = k_{\alpha\Pi\lambda}^q \epsilon_{\alpha},$$

$$k_{\alpha\Pi\lambda}^q = \Delta\Pi_{\lambda\epsilon} [\cdot / \Delta\epsilon_{\alpha q}];$$

$\Delta\Pi_{\lambda\epsilon}$ – шаг квантования параметра из λ -цепи.

Выполнив дополнительное взаимосмещение уровней величины ϵ_{α} и граничных уровней типа $\epsilon_{\text{ог}}$, переходят ко второму варианту равномерного квантования. При этом квантователь формирует дискретную величину

$$\epsilon_{\lambda}^d = \epsilon_{\lambda}^q = k_{\alpha\epsilon\lambda}^q (\epsilon_{\alpha} + 0,5\Delta\epsilon_{\alpha q})$$

либо дискретный параметр

$$\Pi_{\lambda}^d = \Pi_{\lambda}^q = k_{\alpha\Pi\lambda}^q (\epsilon_{\alpha} + 0,5\Delta\epsilon_{\alpha q}).$$

Сравнительно с моделями первого варианта квантования, здесь в соответствующих параметрических схемах перед звеньями, непосредственно содержащими представления операций вида $[\cdot / \Delta\epsilon_{\alpha q}]$, следует разместить звенья суммирования величин ϵ_{α} и $0,5\Delta\epsilon_{\alpha q}$.

Параметрическое выделение текущих значений непрерывной величины $\epsilon = \epsilon(t)$, сужение зависимости $\epsilon(t)$ в пределах задаваемых интервалов вида $I_{\text{нк}} = [t_{\text{нк}}, t_{\text{вк}}]$ показано на рис. 17,а; порядковый индекс k каждого задаваемого интервала времязависим.

После истечения длительности очередного интервала выходная величина соответствующего системного элемента продолжает сохранять уровень, достигнутый ею в момент окончания данного интервала, вплоть до начала последующего разрешенного выделения ее текущих значений. Выход системного блока, реализующей данное сужение временной зависимости входа имеет вид

$$\epsilon_{\epsilon}^d = \epsilon_{\epsilon l}^d(t) = \epsilon|_{I_{\text{нк}}} = \epsilon|_{I_{\text{нк}(t)}}.$$

На рис. 17,б показан вариант параметрического отображения периодически производимой дискретизации (с запоминанием) непрерывной величины $\epsilon(t)$. Этим вариантом предусмотрено выделение звена временного квантования, дискретным выходом которого является преобразованное время

Р и с. 16. Параметрические звенья, изображающие равномерное квантование с выходом-величиной (а) и выходом-параметром (б)

$$t_d = t_{dk} = k_t^q t, \quad k_t^q = k(t)T = k_T T, \quad k_T = [\cdot/T],$$

где T – период возобновления операций дискретизации. Результатом дискретизации является величина

$$\epsilon_e^d = \epsilon_{eT}^d(t) = \epsilon|_{t_{dk}}.$$

Р и с. 17. Выделение зависимости $\epsilon(t)$ на интервалах вида I_{tk} (а) и дискретизация с использованием временного квантования (б)

Системные величины, параметры $\epsilon_{\lambda e}^d, \epsilon_{\lambda}^d, \Pi_{\lambda}^d$ относятся ко множествам кусочно-непрерывных функций соответствующих размерностей, где аргументом выступает величина ϵ_a .

Системные величины типа $\epsilon_e^d(t)$ принадлежат множествам кусочно-непрерывных функций соответствующих размерностей с аргументом-временем.

Погрешности дискретизационных устройств-оригиналов рассмотренных параметрических моделей определяются отклонениями от номиналов, во-первых, уровней типа ϵ_{ar} и, во-вторых, уровней выходов данных устройств. Кроме того, сам вид ступенчатой функции, заменяющей при равномерном квантовании прямопропорциональную зависимость, обуславливает появление известной методической погрешности квантования [38, 77-78].

Включение элемента с дискретно изменяющимся параметром в цепь последовательной конфигурации [28, 30] ведет к появлению дискретного характера изменений у эквивалентных параметров совокупностей промежуточных звеньев, располагаемых на операционной схеме между ее входом и параметрическим изображением указанного дискретизационного элемента.

Некоторые достоинства, приложения и перспективы развития параметрического моделирования. Графоаналитический аппарат, обеспечивающий построение знаковых моделей рассмотренного операционно-параметрического вида, обладает рядом достоинств. Он позволяет организовать, концентрировать модельные знания применительно к внутрицепным, межцепным и комбинированным системно-физическим преобразованиям. На поле самой параметрической схемы выносятся информация, достаточная для однозначной интерпретации функции преобразования данного системного блока. Предусмотрен также вывод информации, требуемой для определения его точностной характеристики и границ изменений выходной величины, которые могут сравниваться с заданными. То есть информационное обеспечение параметрической схемы в рамках единого подхода к ее созданию дает возможность комплексно, разносторонне оценивать техническую сущность и свойства объекта-оригинала.

Кроме того, аппарат операционно-параметрического моделирования обладает полезной способностью выделять необходимые подробности заданного участка технического объекта вплоть до уровня принципиальных схем, что помогает детализировать недостатки рассматриваемого объекта, выявлять его неисправности. С другой стороны, параметрические модели можно свертывать в укрупненные блоки, модули при сохранении, вместе с тем, имеющейся информации, связанной с действием любых участков объекта-оригинала. Таким образом, пользователь имеет возможность регулировать соотношение детализации и укрупненного показа различных модельно-параметрических фрагментов.

В процессе накопления пользователем, исследователем сведений о данном объекте возможно совмещение операционно-параметрических моделей с другими формами представления знаний, например, более глубокими количественными выкладками, специализированными терминологией и схемными обозначениями. При этом дополняется, углубляется понимание пользователем принципа действия, характеристик объекта и его частей, необходимости и границ принятия решений в данной предметно-технической области.

Приложения операционно-параметрического моделирования охватывают довольно широкий круг типовых устройств, описания которых разработаны именно в параметрической форме. Сюда относится, в частности, ряд измерительных преобразователей параметров движения [25,

27-28, 30, 70], давления, механических напряжений, деформаций [30, 42], температуры, влажности [32, 34, 43, 69], расхода жидкостей [34]. Разработанные параметрические модели подчас служат основой для проведения более подробных исследований объектов-оригиналов. Так, например, переход от структурно-базового к расчетно-детализированному описанию реализован в исследовании измерительных преобразователей давления с плоскими мембранами [42].

Кроме того, операционно-параметрическое моделирование встраивается в метод выявления обобщенных (типовых) приемов, направленных на улучшение, модернизацию технических объектов [28, 33-34, 63, 67, 79-82]. В рамках данного метода первичная научно-техническая информация об улучшениях характеристик объектов определенного назначения представляется выстроенным рядом ее источников и соответствующим рядом улучшенных устройств-аналогов.

Справедливость заключения о достигнутых улучшениях, которое содержится в анализируемом информационном источнике, проверяется путем составления и сравнения моделей улучшенного объекта и его прототипов. При составлении описаний протекающих в них процессов имеет смысл обращаться именно к операционно-параметрической концепции [28, 30, 34, 81], используя ее возможности показа того, как, имея какие либо характеристики, действуют детализированные и укрупненные модельные блоки. Доказательность утверждения о наличии улучшений обосновывает результат количественного сравнения одноименных характеристик объектов-аналогов и их прототипов.

В ходе рассмотрения объектов-аналогов и после этого производится обобщение первоначальных формулировок улучшений и составление фонда обобщенных приемов совершенствования, модернизации технических объектов данного назначения. Такими обобщенными формулировками можно пользоваться, в частности, при возникновении потребности повышения качества используемых технических средств. Не следует упускать из вида и дополнительную роль, которую могут взять на себя параметрические модели, обладая способностью фокусировать внимание пользователя на тех или иных узлах устройств- и процессов-оригиналов; их применение может обусловить появление направленности соответственно на дополнительный путь совершенствования анализируемого технического решения.

Пример, относящийся к параметрическому оформлению количественных сведений об улучшении электромагнитных датчиков перемещений, иллюстрируется с помощью схемы, показанной на рис. 18. Она отображает весьма существенный фрагмент действия индуктивного измерительного преобразователя перемещений, функциональный состав которого дополнен вторым чувствительным элементом, конструктивно размещенным напротив первого так, что ферромагнитный подвижный элемент перемещается в промежутке между ними [63].

Р и с. 18. Параметрическая схема преобразования перемещений в напряжение с использованием пары чувствительных элементов

Положим для определенности, что преобразованию подлежат линейные перемещения на участке пропорциональной зависимости индуктивности L_j ($j=1,2$) каждого из чувствительных элементов от координаты X подвижного элемента на заданной оси:

$$L_j = l_j X + L_{Бj}, \quad L_{Бj} = L_j |_{X=0};$$

l_j – крутизна изменения j -той индуктивности при перемещениях подвижного элемента вдоль заданной оси. Для упрощения записей индекс электрической цепи возле обозначений параметров, величин, используемых в настоящем примере, не проставляется.

Указанный характер размещения дополнительного чувствительного элемента позволил существенно ослабить нежелательное влияние на результат преобразования – величину электрического напряжения u_L нерабочих поперечных смещений подвижного элемента δ . Действительно, индуктивность последовательного соединения обмоток первого и второго чувствительных элементов L_Σ складывается из составляющих типа L_j . В индуктивности L_j присутствует общий номинальный компонент

$$L''(X) = l''X + L_B''$$

и её индивидуальное приращение $\Delta L_{\delta j}$, обусловленное влиянием нерабочих смещений δ . Компоненты $\Delta L_{\delta 1}$ и $\Delta L_{\delta 2}$ взаимно однозначны.

Таким образом,

$$L_j(X) = L''(X) + \Delta L_{\delta j}, \quad \Delta L_{\delta j} = (-1)^{j-1} |\Delta l_j(\delta)X + \Delta L_{Bj}(\delta)|,$$

где $\Delta l_j(\delta)$, $\Delta L_{Bj}(\delta)$ – приращения параметров соответственно l_j и L_{Bj} , вызванные нерабочими смещениями.

Суммарная индуктивность пары чувствительных элементов с последовательно включенными обмотками представляется выражением:

$$L_{\Sigma} = L_{\Sigma}'' + \Delta L_{\Sigma}, \quad L_{\Sigma}''(X) = 2(l''X + L_B''); \\ \Delta L_{\Sigma} = \Delta L_{\delta 1} + \Delta L_{\delta 2} = (\Delta l_1(\delta) + \Delta l_2(\delta))X + \Delta L_{B1}(\delta) + \Delta L_{B2}(\delta).$$

Соответственно, реальная функция преобразования рассматриваемого блока считывания первичной информации имеет вид

$$u_L = i'L_{\Sigma} = i'(2(l''X + L_B'') + \Delta L_{\Sigma}),$$

где i' – временная производная переменного тока i , питающего обмотки чувствительных элементов.

При малых отличиях друг от друга абсолютных значений параметров в парах $\Delta l_1(\delta)$, $\Delta l_2(\delta)$ и $\Delta L_{B1}(\delta)$, $\Delta L_{B2}(\delta)$ уровень суммы ΔL_{Σ} , характеризующей остаточное влияние нерабочих смещений на суммарную индуктивность чувствительных элементов, оказывается существенно меньше уровня их влияния на индуктивность считывающего блока, относящегося к прототипу рассматриваемого устройства – датчику перемещения с единственным чувствительным элементом.

Параметрическая схема прототипа представляется левой по частью изображения рис. 18 усовершенствованного устройства, индуктивность чувствительного элемента которого выражается как

$$L_1(X) = L''(X) + \Delta L_{\delta 1}, \quad \Delta L_{\delta 1} = \Delta l_1(\delta)X + \Delta L_{B1}(\delta).$$

Приращения индуктивностей считывающих блоков усовершенствованного датчика и его прототипа, обусловленные воздействием нерабочих смещений, можно сопоставить друг с другом и увидеть, что их абсолютные значения отвечают следующему неравенству:

$$|\Delta L_{\Sigma}| = |(\Delta l_1(\delta) + \Delta l_2(\delta))X + \Delta L_{B1}(\delta) + \Delta L_{B2}(\delta)| < |\Delta L_{\delta 1}|.$$

Характер данного неравенства определяется взаимной однозначностью приращений $\Delta l_1(\delta)$ и $\Delta l_2(\delta)$, а также $\Delta L_{B1}(\delta)$ и $\Delta L_{B2}(\delta)$. Тем самым преимущество датчика с парными чувствительными элементами в части уменьшенного влияния нерабочих смещений на результат измерительного преобразования является доказанным. За вариант считывающего блока, параметры которого зависят от координат подвижного элемента, может быть принята также парная совокупность емкостных чувствительных элементов.

Сущность рассмотренного приема улучшения прототипа – индуктивного (емкостного) датчика перемещений может быть передана следующей формулировкой: “охват подвижного элемента двумя неподвижными чувствительными элементами датчика”.

Операционно-параметрическое описание технических объектов является перспективным видом знакового моделирования. Среди направлений дальнейшего развития операционно-параметрического моделирования можно выделить следующие:

- расширение возможностей интеграции параметрических моделей с иными формами представления знаний о технических объектах, возможностей насыщения моделей полезной информацией, дальнейшее расширение круга моделируемых объектов;
- введение в модели параметров, более дифференцированно распределенных по изображениям пространственных областей, относящихся к объектам-оригиналам;
- расширение масштабов использования в параметрическом моделировании информационных технологий, средств визуализации, обеспечение рациональности такого использования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ольсон Г.Ф.* Динамические аналогии: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1947. 224с.
2. *Босворт Р.Ч.Л.* Процессы теплового переноса: Пер. с англ. М.: ГИТТЛ, 1957. 276с.
3. *Вебер Э.* Переходные процессы в линейных цепях. Т.1: Пер. с англ. М.: Сов. радио, 1958. 392с.
4. *Карлюс У.* Моделирующие устройства для решения задач теории поля: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 487с.

5. *Дульнев Г.Н.* Теплообмен в радиоэлектронных устройствах. М.- Л.: Госэнергоиздат, 1963. 288с.
6. *Бессонов Л.А.* Теоретические основы электротехники: Учебник. М.: Высш. шк., 1964. 751с.
7. *Шимони К.* Теоретическая электротехника: Пер. с нем. М.: Мир, 1964. 775с.
8. *Вейник А.И.* Техническая термодинамика и основы теплопередачи: Учеб. пособ. М.: Металлургия, 1965. 376с.
9. *Островский Л.А.* Основы общей теории электроизмерительных устройств. М.- Л.: Энергия, 1965. 532с.
10. *Мучник Г.Ф., Рубаиов И.Б.* Метод теории теплообмена. Ч.1. Теплопроводность: Учеб. пособ. М.: Высш. шк., 1970. 288с.
11. *Нуберт Г.П.* Измерительные преобразователи неэлектрических величин: Пер. с англ. М.- Л.: Энергия, 1970. 360с.
12. *Краус А.Д.* Охлаждение электронного оборудования: Пер. с англ. Л.: Энергия, 1971. 247с.
13. *Харкевич А.А.* Избранные труды: В 3-х т. Т.1. М.: Наука, 1973. 400с.
14. *Букреев И.Н., Шер Ю.А., Шишов В.Р.* Электротепловые функциональные элементы // Микроэлектроника: Сб. статей под ред. А.А. Васенкова. М.: Сов. радио, 1974. С.79-90.
15. Применение теории графов связей в технике: Пер. с англ. / Под ред. *Д. Кэрнона и Р. Розенберга*. М.: Мир, 1974. 95с.
16. *Зариов М.Ф.* Датчики малых угловых скоростей: Учеб. пособ. Уфа: Уфим. авиац. ин-т, 1975. 73с.
17. *Кривоносов И.И.* Электромеханические измерительные преобразователи давлений высокотемпературных сред. М.: Энергия, 1975. 96с.
18. *Моль Р.* Гидропневмоавтоматика: Пер. с франц. М.: Машиностроение, 1975. 352с.
19. *Дружинский И.А.* Механические цепи. Л.: Машиностроение, 1977. 240с.
20. *Пошехонов П.В., Соколовский Э.И.* Тепловой расчет электронных приборов: Учеб. пособ. М.: Высш. шк., 1977. 158с.
21. *Зариов М.Ф., Мамаджанов А.М., Петрова И.Ю.* Анализ динамических характеристик элементов систем управления по структурным схемам: Учеб. пособ. Ташкент: Ташкент. политехн. ин-т, 1978. 90с.
22. *Ленк А.* Электромеханические системы. Системы с сосредоточенными параметрами: Пер. с нем. М.: Мир, 1978. 285с.
23. *Зариов М.Ф., Петрова И.Ю.* Проблемы развития информационной элементной базы систем управления и вычислительной техники. Препринт доклада. Уфа: Башк. филиал АН СССР, 1979. 52с.
24. *Петрова И.Ю.* Микроэлементы систем управления с распределенными параметрами различной физической природы. М.: Наука, 1979. 111с.
25. *Петрова И.Ю., Бурханов В.Х.* Полупроводниковые преобразователи механических величин в электрические: Учеб. пособ. Ташкент: Ташкент. политехн. ин-т, 1979. 83с.
26. *Тетельбаум И.М., Тетельбаум Я.И.* Модели прямой аналогии. М.: Наука, 1979. 384с.
27. *Зариов М.Ф., Сулейманов Н.Т., Петрова И.Ю.* Надежность элементов и средств управления с распределенными параметрами. М.: Наука, 1980. 153с.
28. *Зариов М.Ф., Никонов А.И.* Элементы электромагнитных преобразователей перемещений: Учеб. пособ. Уфа: Уфим. авиац. ин-т, 1980. 92с.
29. *Вахитов Я.Ш.* Теоретические основы электроакустики и электроакустическая аппаратура. М.: Искусство, 1982. 415с.
30. *Зариов М.Ф., Никонов А.И., Петрова И.Ю.* Элементы теории информационных моделей преобразователей с распределенными параметрами. Уфа: Башк. филиал АН СССР, 1983. 156с.
31. *Левшина Е.С., Новицкий П.В.* Электрические измерения неэлектрических величин: Учеб. пособ. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 320с.
32. Многокритериальная оптимизация измерительных преобразователей: Учеб. пособ. / *Зариов М.Ф., Исмагуллаев П.Р., Плахтиева С.Х. и др.* Ташкент: Ташкент. политехн. ин-т, 1983. 44с.
33. *Петрова И.Ю., Зариов М.Ф., Никонов А.И.* Физические основы энергоинформационных моделей и параметрических структурных схем. Препринт доклада. Уфа: Башк. филиал АН СССР, 1984. 25с.
34. *Зариов М.Ф., Зайнуллин Н.Р., Петрова И.Ю.* Энерго - информационный метод научно – технического творчества: Учеб.-метод. пособ. М.: ВНИИПИ, 1988. 125с.
35. *Львович А.Ю.* Электромеханические системы: Учеб. пособ. Л.: Лен. гос. ун-т, 1989. 296с.
36. Основы теории подобия, размерности, моделирования: Учеб. пособ. / *Алабужев П.М., Кирнарский М.Ш., Полищук В.Г. и др.* Курск: Курск. политехн. ин-т, 1993. 103с.
37. *Петрова И.Ю., Шикунская О.М.* Анализ механических систем на основе электро – механических аналогий // Компьютеризация уч. процесса по электротехн. дисциплинам: Тез. докл. III межвуз. науч.-метод. конф. Астрахань: Астрахан. гос. техн. ун-т, 1995. С.155-156.
38. *Никонов А.И., Семенычев В.К.* Введение в анализ характеристик управляющих и измерительных систем: Учеб. пособ. Самара: Сам. гос. техн. ун-т, 1997. 64с.
39. Энергоинформационные основы анализа и синтеза технических устройств: Учеб. пособ. / *Кагаков Ю.Н., Зариов М.Ф., Петрова И.Ю., Полухин Г.А.* Астрахань: Астрахан. гос. техн. ун-т, 1997. 57с.
40. *Полухин Г.А., Кагаков Ю.Н.* Моделирование физических свойств магнитопровода // Вестник Астрахан. гос. техн. ун-та. Вып. 3. Автоматика и прикладные вопросы математики и физики. 1997. С.41-46.
41. *Полухин Г.А.* Анализ и синтез магнитных цепей при энерго – информационном моделировании. Автор. дис. ... канд. техн. наук. Астрахань, 2000. 24с.
42. *Шикунская О.М.* Распределенные энергоинформационные модели упругих элементов микроэлектронных преобразователей механических величин. Автореферат дис. ... канд. техн. наук. Астрахань, 2000. 24с.
43. *Щербинина О.В.* Синтез чувствительных элементов систем управления на основе реляционной модели организации знаний. Автореферат дис. ... канд. техн. наук. Астрахань, 2001. 24с.
44. *Никонов А.И.* Формы типовых структурно – параметрических отображений // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Техн. науки. 2004. № 20. С.78-85.
45. *Никонов А.И.* Критериально-множественная основа формирования операционных моделей физических цепей // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. 2004. № 26. С.174-179.

46. Никонов А.И. Операционно – параметрическая сеть с участками суммирования // Мат. моделирование и краевые задачи: Тр. Всерос. науч. конф. Ч.2. Самара: СамГТУ, 2004. С.184-186.
47. Электрические измерения неэлектрических величин / Туричин А.М., Новицкий П.В., Левишина Е.С. и др. М.: Энергия, 1975. 576с.
48. Треногин В.А. Функциональный анализ: Учеб. пособ. М.: Наука, 1980. 496с.
49. Хатсон В., Пим Дж. Приложения функционального анализа и теории операторов: Пер. с англ. М.: Мир, 1983. 432с.
50. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1978. 400с.
51. Моисеев Н.Н. Математика ставит эксперимент. М.: Наука, 1979. 224с.
52. Шуп Т. Решение инженерных задач на ЭВМ: Пер. с англ. М.: Мир, 1982. 237с.
53. Тихонов А.Н., Костомаров Д.П. Вводные лекции по прикладной математике. М.: Наука, 1984. 192с.
54. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ: Учеб. пособ. М.: Высш. шк., 1989. 367с.
55. Воронин Н.И. Теория систем для электроэнергетиков : Учеб. пособ. Новосибирск: Наука, 2000. 273с.
56. Волкова В.Н., Денисов А.А. Основы теории систем и системного анализа: Учебник. СПб: С.-Петербург. гос. техн. ун-т, 2001. 512с.
57. Никонов А.И. Процессные улучшения на основе оператора развития // Улучшение качества проектов и процессов: Матер. науч.-техн. конф. Ульяновск: Ульянов. гос. техн. ун-т, 2004. С.99-102.
58. Прохоров А.Ф. Конструктор и ЭВМ. М.: Машиностроение, 1987. 272с.
59. Спицнадель В.Н. Основы системного анализа: Учеб. пособ. СПб: Бизнес – пресса, 2000. 326с.
60. Жариков О.Н., Королевская В.И., Хохлов С.Н. Системный подход к управлению: Учеб. пособ. М.: ЮНИТИ – ДАНА, 2001. 62с.
61. Электрические измерительные преобразователи / Кончаловский В.Ю., Купершмидт Я.А., Сыропятова Р.Я., Харченко Р.Р. М.-Л.: Энергия, 1967. 408с.
62. Проектирование датчиков для измерения механических величин / Осадчий Е.П., Тихонов А.И., Карпов В.И. и др. М.: Машиностроение, 1979. 480с.
63. Никонов А.И., Погорелова Е.В., Черкасский Е.П. Введение в автоматизированные информационные системы совершенствования технических изделий: Учеб. пособ. Самара: СамГТУ, 1997. 56с.
64. Рапопорт Г.Н., Солин Ю.В., Гривцов С.П. Автоматизированные системы управления технологическими процессами. М.: Машиностроение, 1977. 245с.
65. Столл Р. Множества. Логика. Аксиоматические теории: Пер. с англ. М.: Просвещение, 1968. 232с.
66. Никонов А.И. Свойства оператора развития и их приложение к системному совершенствованию // Научно – техническое творчество и изобретательство в научении физике: Докл. междунар. науч.-практ. конф. Самара: Сам. гос. пед. ун-т, 2001. С.43-44.
67. Никонов А.И. Исследование индуктивных преобразователей перемещений с ферромагнитными кодовыми дорожками. Автореферат дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 1977. 23с.
68. Никонов А.И. К анализу индуктивных преобразователей с перекрытыми кодовыми дорожками // Элементы систем управления с распределенными параметрами различной физической природы: Сб. тр. Уфа: Башк. филиал АН СССР, 1980. С.78-82.
69. Петрова И.Ю., Азнабаев Ю.А., Асфандиярова Р.Ф. Алгоритм выбора оптимальной структурной схемы преобразователя по критерию максимальной чувствительности // Элементы систем управления с распределенными параметрами различной физической природы: Сб. тр. Уфа: Башк. филиал АН СССР, 1980. С.52-60.
70. Мурашов И.К., Иванов Н.Е. К анализу работы автокомпенсационного устройства автоматического взвешивания и порционного дозирования // Элементы систем управления с распределенными параметрами различной физической природы: Сб. тр. Уфа: Башк. филиал АН СССР, 1980. С.102-107.
71. Заринов М.Ф., Никонов А.И. Параметрические структуры релейного преобразования величин различной физической природы // Датчики систем измерения, контроля и управления: Сб. тр. Вып.1. Пенза: Пензен. политехн. ин-т, 1981. С.33-37.
72. Никонов А.И. Модель распределения воздействий и реакций в протяженной среде с дискретными параметрами // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. 2003. № 19. С.139-143.
73. Фихтенгольц Г.М. Основы математического анализа. Т.1. М.: Наука, 1968. 440с.
74. Браславский Д.А., Петров В.В. Точность измерительных устройств. М.: Машиностроение, 1976. 312с.
75. Никонов А.И. О задачах определения компонентов – величин операционно – параметрических моделей // Успехи современного естествознания. 2004. №8. С123-124.
76. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа. М.: Наука, 1989. 624с.
77. Темников Ф.Е., Афонин В.А., Дмитриев В.И. Теоретические основы информационной техники: Учеб. пособ. М.: Энергия, 1979. 512с.
78. Алиев Т.М., Тер-Хачатуров А.А. Измерительная техника: Учеб. пособ. М.: Высш. шк, 1991. 384с.
79. Выявление обобщенных приемов улучшения основных характеристик преобразователей с распределенными параметрами / Заринов М.Ф., Файрушина Т.А., Зайнутдинова Л.Х., Мамаджанов А.М. // Теория информационных систем и систем управления с распределенными параметрами: Матер. III Всесоюз. симпозиума. М.: Наука, 1978. С.148-153.
80. Половинкин А.И. Основы инженерного творчества: Учеб. пособ. М.: Машиностроение, 1988. 368с.
81. Никонов А.И., Говердовский Н.Н. Формирование обучающего режима обобщения принципов технической модернизации // Приборы, системы, информатика: Сб. тр. Самара: СамГТУ, 1997. С.66-69.
82. Никонов А.И., Гурьев В.А. О подходе к разработке системы поиска приемов ремонта и модернизации оборудования // Ашировские чтения: Докл. междунар. науч.-практ. конф. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2002. С.100.

Поступила 20.10. 2004 г.