



Министерство образования и науки российской федерации
Владивостокский государственный университет экономики и сервиса

Институт информатики, инноваций и бизнес систем

Кафедра электроники



«Основы конструирования и технологии производства РЭУ»

Тема «Системный подход при проектировании РЭУ»

Ведущий преподаватель: Белоус И.А.

Владивосток, 2014



СОДЕРЖАНИЕ

1. Системный подход — методологическая база создания РЭС
2. Основы системного анализа, синтеза и оптимизации параметров конструкций РЭС
 - 2.1 Модели РЭС в задачах проектирования конструкций
 - 2.2 Расчётные модели РЭС
 - 2.3 Функции чувствительности



ЛИТЕРАТУРА

1. Основы конструирования и технологии радиоэлектронных средств: учебное пособие для студ. вузов / Г. Ф. Баканов, С. С. Соколов, В. Ю. Суходольский. - М.: Академия, 2007. - 368 с.: ил.



1.1 Системный подход — методологическая база создания

Конечной целью любой **РЭС** опытно-конструкторской разработки изделия является запуск его в серийное производство, обеспечивающее при заданном уровне рентабельности выпуск конкурентоспособной продукции. При этом конкурентоспособность изделия на рынке обеспечивают за счет его высокого качества (совокупности функциональных, потребительских свойств), высокой надежности (совокупности эксплуатационных свойств), серийнопригодности, технологичности (совокупности конструктивно-технологических свойств) и низкой себестоимости (экономической эффективности разработки).



Качественно конкурентоспособность изделия, обладающего устойчивым спросом на рынке, можно представить некоторым показателем U «устойчивости» пирамиды, стороны основания которой есть суть категории качества, надежности и серийной пригодности изделия, а высота — суть категории стоимости. Очевидно, что устойчивость такой пирамиды будет возрастать с увеличением площади ее основания и уменьшением высоты или с увеличением площади ее поверхности S и уменьшением объема V . Таким образом, $U \Rightarrow \{\min V \max S\}$ есть некоторый минимаксный показатель конкурентоспособности РЭС, компоненты которого — явные антагонисты.



Сложность разработки такого конкурентоспособного изделия обусловлена, прежде всего, начальной неопределенностью исходных данных для решения конкретных проектных задач. В ходе выполнения проектного этапа (последовательного выпуска и защиты аванпроекта, эскизного, технического и рабочего проектов) эту неопределенность постепенно устраняют, однако взаимозависимость решений отдельных задач проектирования может сохраняться до момента выпуска серийной продукции и постановки ее на эксплуатацию.



Практика разработки современных РЭС показала, например, неэффективность и нецелесообразность проектирования принципиальных схем устройств без учета состояния и перспективы развития элементной базы ЭРК и конструкций; в свою очередь, решения по конструкции должны приниматься с учетом технологических возможностей производства.

Следовательно, разработку конкурентоспособных РЭС необходимо выполнять как **комплексное проектное исследование** схем, конструкций и технологий, включающее в себя расчеты, моделирование, макетирование, изготовление опытных образцов и их испытания, а также другие методы исследования.



Теоретической предпосылкой для такого комплексного подхода к созданию РЭС является представление его как большой или сложной технической системы.

В общем случае «системой» называют объект любой природы (либо совокупность объектов любой природы, в том числе различной), обладающий выраженным «системным свойством», отсутствующим у отдельных частей системы при любом способе ее членения и не выводимым из свойств частей. Важнейшими имманентными свойствами систем S являются их структура, через которую выражают все многообразие современных систем, и характер поведения, по которому различают системы сложные S_0 , детерминированные S_1 , стохастические S_2 и хаотические S_3 .



Исследование таких объектов проводят на основе **системного подхода** — ведущего общенаучного подхода в методологии познания, направленного на поиск и сохранение механизмов целостности объектов и выявления в них существенных связей.

Чтобы ответить на вопрос, являются ли современные РЭС большими техническими системами, рассмотрим основные признаки, по которым объекты любой природы относят к большим или сложным системам.



Любая большая система:

- 1) состоит из конечной совокупности элементов, объединенных посредством различного рода связей, направленных на достижение определенных целей;
- 2) имеет внутреннюю структуру в виде упорядоченной совокупности иерархически соподчиненных подсистем, взаимодействующих между собой;
- 3) обладает уникальным свойством по отношению к соподчиненным подсистемам (свойством эмерджентности, от англ. **emergence** — возникновение, появление);
- 4) является частью системы более высокого уровня (суперсистемы), при взаимодействии с которой проявляются ее свойства (т.е. система является открытой);



Кроме того, существование любой системы должно удовлетворять:

- 1) принципу **физичности**, в соответствии с которым всякой системе присущи физические законы, определяющие внутренние причинно-следственные связи ее функционирования;
- 2) принципу **целенаправленности**, который понимают как функциональную тенденцию, направленную либо на достижение системой некоторого состояния, либо на усиление (сохранение) некоторого процесса. При этом система способна противостоять внешнему воздействию, а также использовать среду и случайные события (например, мутации);
- 3) принципу **моделируемости**, в соответствии с которым сложная система может быть представлена множеством моделей, каждая из которых отражает определенную грань ее сущности.



Современные РЭС, такие как радиоэлектронные системы и комплексы, обладают этими системными признаками и могут быть отнесены к большим (сложным) техническим системам — функциональным, конструктивным, технологическим.

Системный подход проявляется и в методологии проектирования и изготовления серийных РЭС, определяющей строгую последовательность выполнения отдельных этапов, при которой результат выполнения предыдущего этапа является исходным для выполнения последующих этапов.



Выполнение **проектной стадии** ОКР, которой предшествовала разработка и согласование общего технического задания и частных ТЗ на их проведение, подразделяется на следующие этапы:

- 1) разработка и защита технического предложения (ПТ) или аван-проекта, результатом которых является техническое и технико-экономическое обоснование целесообразности разработки проекта;
- 2) разработка и защита эскизного проекта (ЭП), результатом которых являются принятые принципиальные технические решения, дающие общие представления об устройстве изделия, принципе его функционирования и возможности практической реализации;



) разработка и защита технического проекта (ТП),
результатом которых являются принятые
окончательные технические решения, дающие полное
представление об устройстве изделия, принципах его
функционирования, способах изготовления и методах
испытаний.

Результатом выполнения каждого этапа проектной
стадии является техническая документация (описания,
схемы, чертежи, инструкции, протоколы испытаний),
являющаяся исходной для выполнения последующих
этапов. При этом в выполнении каждого из проектных
этапов участвуют разные специалисты, число которых
по мере увеличения уровня детальности проекта возрастает,
а степень их осведомленности о проекте в целом
уменьшается.



При выполнении **рабочей стадии** выпускают полный комплект конструкторской и технологической документации (КД и ТД) на опытный образец изделия, изготавливают его, проводят предварительные испытания (ПИ) и корректируют документацию. После доработки образца проводят его приемочные испытания, по результатам которых документацию еще раз корректируют и передают ее на серийный завод.



- На заводе изготавливают и испытывают установочную серию изделия, выявляя недостатки, не замеченные ранее. По результатам испытаний проводят последнюю корректировку документации и передают подлинники документов на завод.
- На стадии **установившегося серийного производства** изготавливают и испытывают головную серию изделия под авторским надзором и только после этого начинают серийный выпуск изделия.



2 Основы системного анализа, синтеза и оптимизации параметров конструкций РЭС

2.1 Модели РЭС в задачах проектирования конструкций

- Системный анализ, синтез и оптимизацию параметров конструкций и технологий производства РЭС проводят в ходе комплексного проектного исследования математического, имитационного или (и) натурального моделирования протекающих в РЭС физических процессов, а также сопутствующих им организационных, экономических и других процессов (в дальнейшем — технических).



В общем виде любой технический процесс можно формально описать через математический оператор $Y(\psi) = \{x(\psi), q\{z(\psi)\}\}$ связывающий множество выходных характеристик $y = [y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_n]^T$ (наблюдаемых параметров, где T — знак транспонирования) с множеством входных воздействий $x = [x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_M]^T$ (параметров управления) и множеством внутренних параметров $q = [q_1, q_2, \dots, q_k, \dots, q_L]^T$ (параметров состояния), зависящих от множества внешних факторов $z = [z_1, z_2, \dots, z_r, \dots, z_p]^T$ (параметров возмущения). Здесь ψ — это независимые аргументы $t, s, l, \omega, T, \dots$, соответственно время, комплексная переменная, пространственная координата, круговая частота, температура и др.



При этом следует иметь в виду, что один и тот же фактор в разных физических процессах и конкретных задачах проектирования РЭС может играть различную роль. Так, например, в электрических расчетах тепловой поток P — выходная величина, в тепловых расчетах — это входное воздействие, а в механических — внешний фактор.

- Различие же между входным воздействием и внешним фактором состоит в том, что входное воздействие есть физическая переменная, вызывающая появление или динамическое изменение рассматриваемого физического процесса при неизменных значениях параметров конструкции РЭС.



- В то же время внешний фактор, имея физическую природу, отличную от рассматриваемого физического процесса, вызывает изменение параметров конструкции РЭС независимо от входных воздействий.



Таблица 1.1

<p>Исследование точности (анализ отклонений выходных параметров)</p>	<p>При воздействии технологических факторов</p> <p>⇐ ⇒</p>	<p>Исследование серийнопригодности (анализ доли годных изделий)</p>
<p>Исследование стабильности (синтез допусков на отклонение внутрен- них параметров, обеспе- чивающих работоспособ- ное состояние)</p>	<p>При воздействии факторов условий эксплуатации</p> <p>⇐ ⇒</p>	<p>Исследование надежности (синтез показателей надежности ЭРК, обеспечивающих заданный уровень надежности РЭС)</p>



В свою очередь, внутренние параметры подвержены воздействию технологических и эксплуатационных факторов, вызывающих разброс и изменение их значений в процессе изготовления и эксплуатации РЭС.

Целью исследования является определение границ **области работоспособности** изделия, размеры которой зависят от точности и стабильности его выходных параметров (показателей качества изделия). Вероятности нахождения этих параметров внутри данной области характеризуют уровни **серийнопригодности** и **надежности** изделия. Взаимосвязь возникающих при этом задач анализа и синтеза показана в табл. 1.1.



- Влияние изменения внутренних параметров на выходные параметры РЭС учитывают для конкретной модели РЭС через показатели параметрической чувствительности (ПЧ), т.е. функции чувствительности.



2.2 Расчетные модели РЭС

- Под расчетной моделью вообще понимают форму математического описания или иного представления объекта или процесса, адекватно отражающего его сущность и свойства.
- **Необходимость построения расчетных моделей РЭС связана с исследованием их ПЧ к воздействию факторов производства и условий эксплуатации.**
- Для уникального объекта модель является единственной возможностью исследования и предсказания его поведения, и ее строят вместе с объектом.



- Степень соответствия модели реальному объекту (ее полнота) определяет точность и время расчетов параметров РЭС, проводимых на ее основе.
- Излишне подробная детализация описания объекта (процесса) увеличивает сложность модели, повышает точность расчетов по ней, но требует и больших временных затрат при работе с ней; огрубление описания объекта, упрощение его модели снижает точность расчетов, позволяя в то же время быстрее получить результаты.



Классификационное пространство моделей РЭС подразделяется следующим образом:

- 1) основные **классы** — модели математические, имитационные, натурные;
- 2) основные **группы** — модели детерминированные и вероятностные;
- 3) основные **типы** — модели электрические, тепловые, механические и другие, описывающие объект с точки зрения некоторого происходящего в нем процесса;
- 4) основные **виды** — модели аналитические, структурные, топологические и морфологические.



- В данном курсе рассматривается класс **математических** моделей.
- Модели **имитационные** и **натурные** представляют собой либо точные копии объекта, специально предназначенные для проведения всесторонних исследований, либо его макеты, имитирующие какой-либо из процессов, протекающих в реальном объекте (тепловой, массогабаритный и др.).
- Параметры **детерминированных** моделей могут быть рассчитаны или измерены с заданной точностью. Параметры **вероятностных** моделей описываются в терминах теории вероятностей и математической статистики.



- Разные типы моделей должны отвечать общим требованиям.
- Расчетные **электрические** модели должны адекватно отражать электрические процессы, происходящие в схеме и конструкции; включать в себя эквивалентные схемы реальных электрических элементов с учетом их взаимного расположения; учитывать паразитные электрические параметры элементов и конструкций, а также электрические наводки от окружающих объектов и среды.



- Расчетные **тепловые** модели должны адекватно отражать тепловые процессы в конструкции, связанные с теплообменом объекта с окружающей средой за счет действия известных механизмов теплопередачи и с учетом внутреннего тепловыделения; включать в себя эквивалентные представления реальных путей передачи теплового потока; учитывать теплофизические параметры и анизотропность тепловых свойств элементов и конструкций.



Расчетные **механические** модели должны адекватно отражать механические процессы в конструкциях, вызывающие появление в них напряжений и деформаций при внешних механических воздействиях; включать в себя эквивалентные представления конструктивных элементов с учетом вида их исполнения и способа крепления; учитывать характер распределения масс элементов и несущих конструкций, анизотропность механических свойств, реальную жесткость элементов и конструкций и жесткость их взаимного крепления, эффекты внутреннего трения в материалах при деформациях и особенно при резонансах.



Детерминированные расчетные модели

Аналитические модели. Под аналитической расчетной моделью понимают математическую модель, представленную в форме алгебраического выражения через оператор $Y(\psi)$, определяющий зависимость выходных характеристик y от входных воздействий x , внутренних параметров q и независимых аргументов ψ (t, s, l, w).

Общей формой представления аналитической расчетной модели является нелинейная вектор-функция с явной [$y = \varphi(x, q, \psi)$] или неявной [$F(y, x, q, \psi) = 0$] функциональной зависимостью. Примерами аналитической модели являются линейные и нелинейные алгебраические, дифференциальные и интегральные уравнения и системы этих уравнений.



Пример 1.1. Выполним аналитическое описание электрической модели процесса передачи помехи при топологии печатного монтажа, приведенной на рис. 1.1, а.

В цепи, соединяющей элементы 1 и 2, через ближние электрическое ($C_{\text{пар}}$) и магнитное ($M_{\text{пар}}$) поля возникает помеха от цепи, соединяющей элементы 3 и 4. Параметры помехи $y_1 = \varphi_1$, $y_2 = \varphi_2$, $y_3 = i_1$, $y_4 = i_2$, являются выходными параметрами модели.

При принятых обозначениях параметры входных воздействий x_1 и x_2 запишем в виде $x_1 = E(t) = \varphi_1(t) - \varphi_2(t)$; $x_2 = I(t) = i_1(t) + i_2(t)$, а внутренние параметры в виде $q_1 = C_1$, $q_2 = G_1$, $q_3 = C_2$, $q_4 = G_2$. Тогда данную модель можно представить следующей системой уравнений в операторной форме:

$$\begin{aligned} y_1(s) &= x_1(s) + y_2(s) & y_2(s) &= y_4(s)(q_3s + q_4)^{-1} \\ y_3(s) &= y_1(s)(q_1s + q_2) & y_4(s) &= x_2(s) + y_3(s) \end{aligned}$$

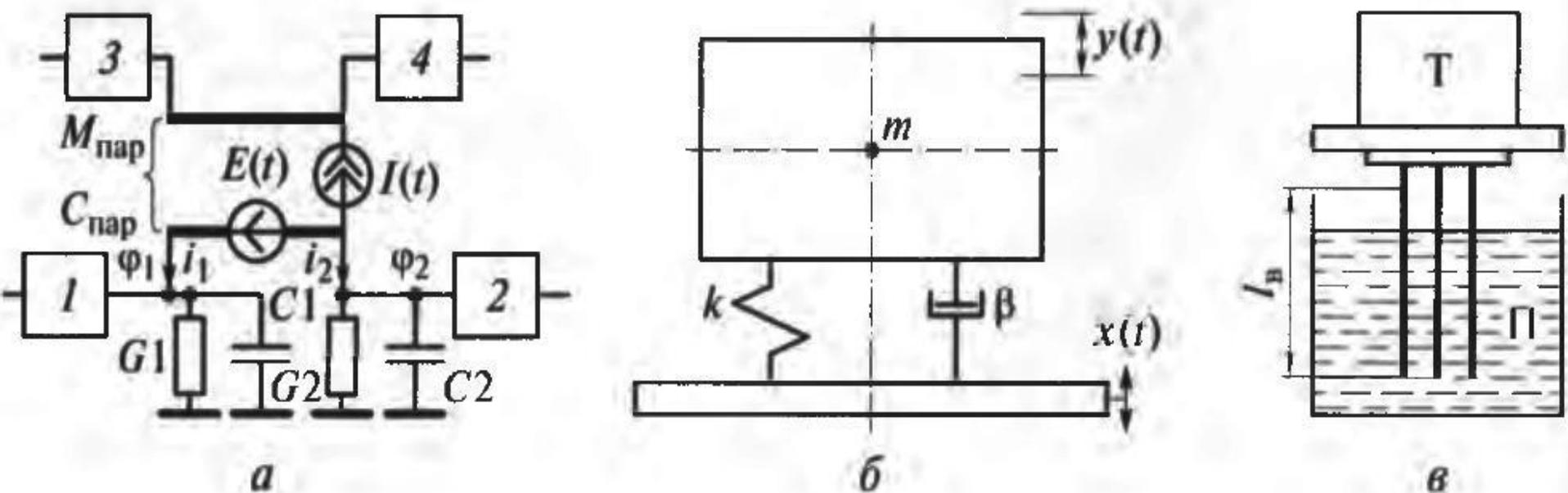


Рис. 1.1. Виды возмущений в РЭС:

а — электрическая помеха; б — кинематическое возбуждение колебаний конструкции; в — тепловое воздействие в процессе пайки элемента; 1...4 — элементы схемы



Пример 1.2. Для модели механической системы с сосредоточенной массой m и одной степенью свободы, приведенной на рис. 1.1, б, аналитическим описанием процесса вынужденных колебаний $y(t)$ при кинематическом возбуждении $x(t)$ будет дифференциальное уравнение для сил инерции, трения, упругости и внешней силы, выраженных через параметры движения и внутренние параметры системы:

$$m\ddot{y} + \beta\dot{y} + ky = \beta\dot{x} + kx.$$



Пример 1.3. Для модели на рис. 1.1, в процесса теплопередачи, возникающего при облуживании припоем (П) выводов транзистора (Т), выходным параметром является температура вывода T_B у основания транзистора, входными воздействиями — температура припоя T_{Π} и время пайки t_{Π} , внутренними параметрами — длина вывода l_B и параметры припоя: теплопроводность λ_{Π} , теплоемкость c_{Π} и коэффициент объемного расширения β_{Π} .

Тогда описать процесс теплопередачи можно уравнением вида:

$$T_B = T_{\Pi} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{l_B}{2\sqrt{t_{\Pi}\lambda_{\Pi}/c_{\Pi}\beta_{\Pi}}} \right) \right],$$

где интеграл вероятности

$$\operatorname{erf}(\cdot) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\cdot} \exp(-z^2) dz$$



Под структурной расчетной моделью понимают математическую модель, представленную в виде функциональной схемы или направленного графа (рис. 1.2).

Такая модель описывает внутреннее строение изделия с учетом последовательности преобразования в нем переменных и в соответствии с принятыми причинно-следственными связями в протекающих физических процессах. Структурная модель раскрывает общее операторное описание $Y(\psi)$ процесса через множество $\{ W_1 \}$ других математических операторов, характеризующих протекание этого процесса в отдельных частях изделия.



На рис. 1.2, а представлена структурная модель функциональной схемы радиоприемного устройства. В каждом узле схемы происходят определенные функциональные преобразования спектра полезного сигнала, описываемые операторами дуги, связывающие модули, заданы входными x и выходными y переменными. Структурная модель радиоприемного устройства в форме направленного графа, приведенная на рис. 3.2, б, строится по следующим правилам:

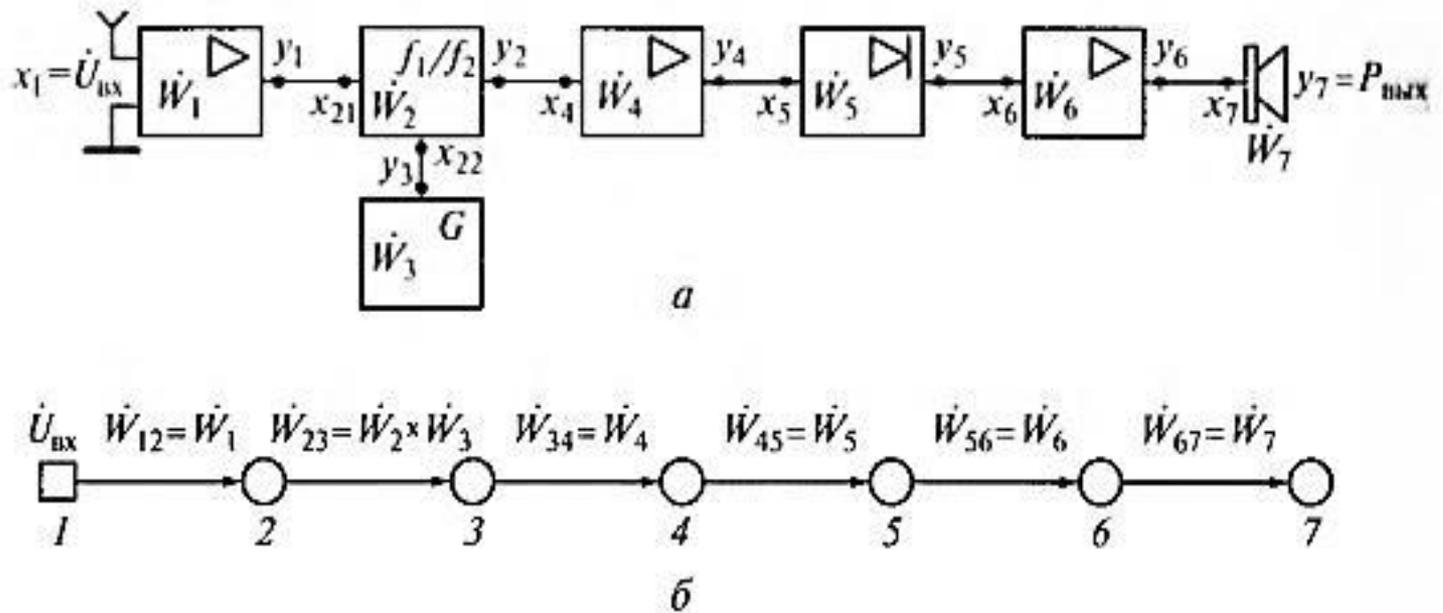


Рис. 1.2. Структурная модель тракта радиоприемного устройства:

a — в виде функциональной схемы; *b* — в виде направленного графа; 1... 7 — узлы графа



- Все вершины нумеруются и каждой вершине ставится в соответствие входная, выходная или промежуточная переменные. При этом выходная переменная может быть упомянута только один раз и в ее вершину должен быть хотя бы один вход;
- переменный параметр вершины передается по направлению, указанному стрелками дуг;
- каждой дуге соответствует оператор преобразования W_{ij} ; переменную вершины получают сложением переменных по входящим дугам.

Сложная структурная модель в виде направленного графа может быть упрощена по правилам его преобразования.



Топологические модели

Под топологической расчетной моделью понимают математическую модель в виде эквивалентной электрической (механической, тепловой) цепи или (в общем виде) ненаправленного топологического графа, на котором заданы потенциальные и потоковые переменные и физические параметры рассматриваемых процессов и который полностью определяет физическую взаимосвязь этих переменных через параметры.

Топология — это раздел математики, изучающий инвариантные свойства геометрических фигур, проявляющиеся при их непрерывном пространственном преобразовании; непрерывность всякий раз нарушается при введении новых конструктивных элементов или устранении каких-либо ранее существовавших.



Топологическое свойство моделируемых процессов в конструкции состоит в том, что для заданного конструктивного решения число областей (точек, линий, объемов) остается неизменным лишь при сохранении непрерывности пространственных преобразований конструкции: смещений ЭРК и конструктивных элементов, а также изменений в определенных пределах их геометрических размеров и физических свойств (электропроводности, теплопроводности, влагопроницаемости, механической жесткости). На одной топологической расчетной модели объекта можно изучать различные физические процессы через их потенциальные и потоковые переменные и **реологические** (от гр. rheos — течение, поток) параметры, описывая поведение объекта через ПЧ.



Потенциальные переменные — электрический потенциал, температура, механическое напряжение, пространственная координата — и **ПОТОКОВЫЕ** переменные, создаваемые потоками субстанций (электрических зарядов, тепловой энергии, влаги, механических импульсов), характеризуют состояние определенной области конструкции, в которой могут протекать одновременно различные физические процессы.



Для унифицированных топологических моделей разнородных физических процессов, представляемых в виде ненаправленных графов, можно выделить потенциальные и потоковые переменные и реологические параметры, отражающие фундаментальные свойства компонентов и конструкции изделия в целом.

Смысл же унификации состоит в том, что переменные величины (узла и ветви) и реологические параметры, относящиеся к разным физическим процессам, могут быть заданы на единой топологической модели, что позволяет использовать для расчета одну программу, составленную для анализа ненаправленного графа.



Унифицированная топологическая модель		Параметры частных топологических моделей		
		электрической цепи (рис. 3.3, а)	механической цепи (см. рис.3.1, б)	тепловой цепи (см. рис.3.1, в)
Потенциальные и потоковые переменные	Переменная узла x	Электрический потенциал φ	Параметры движения z, \dot{z}, \ddot{z}	Температура в точке T
	Переменная ветви ψ	Ток ветви I	Сила F	Тепловой поток P_T
Реологические параметры	Диссипативный параметр ветви α	Проводимость G	Коэффициент диссипации энергии β	Тепловая проводимость G_T
	Консервативный параметр 1-го рода β	Емкость конденсатора C	Масса тела m	Тепловая емкость C_T
	Консервативный параметр 2-го рода γ	Индуктивность катушки L	Коэффициент жесткости k	—

Примеры таких переменных и реологических параметров для физических процессов, протекающих в конструкциях РЭС, представлены в табл. 1.2.



Для процесса действия перекрестной помехи на рис. 1.3 представлены топологические модели в форме электрической эквивалентной цепи и ненаправленного графа

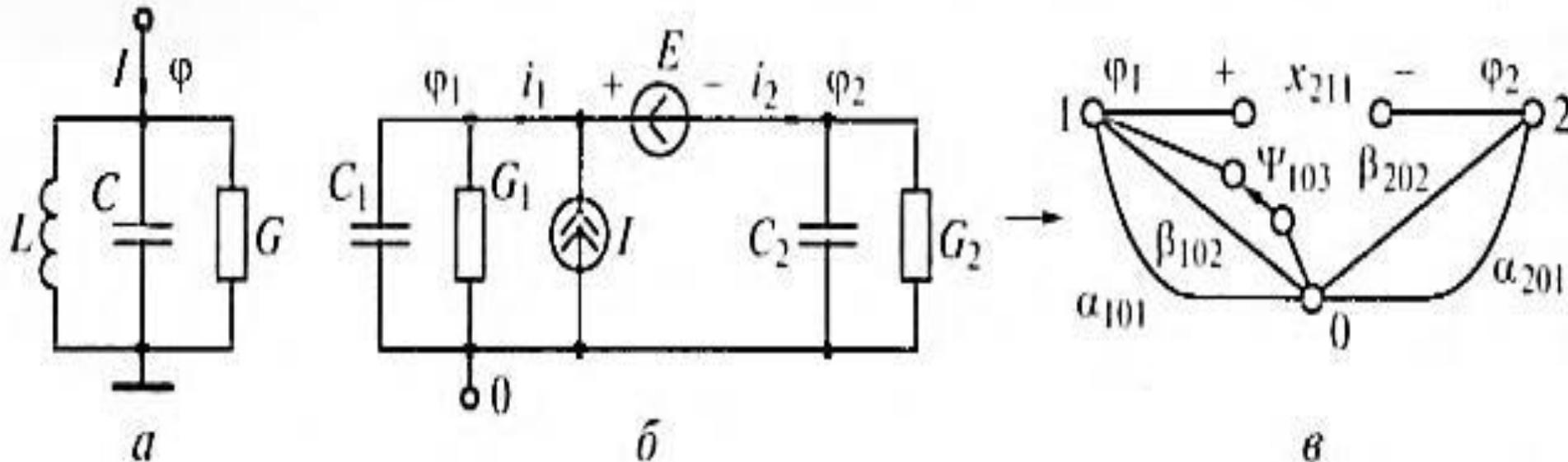


Рис. 1.3. Электрические топологические модели:
а — параллельного колебательного контура; б — эквивалентная схема цепи передачи перекрестной помехи; в — цепь передачи перекрестной помехи в форме ненаправленного графа; 0...2 — узлы графа



Значения потенциальных и потоковых переменных и реологических параметров на рис. 3.3, в следующие: $x_{211} = E$; $\Psi_{103} = I$; $a_{101} = G_2$, $\beta_{102} = C_1$, $\beta_{202} = C_2$.
Здесь принят следующий принцип кодирования индексов: первые два числа указывают номера узлов, между которыми они включены, а третье — порядковый номер ветви, включенной между данными узлами, независимо от ее содержания.



Морфологические модели

- Под морфологической расчетной моделью понимают математическую модель изделия в виде соединения многополюсников или ненаправленного морфологического графа (гиперграфа), определяющего способ построения этого изделия из его выделенных составных частей, представляющих протекающий в нем физический процесс.



Морфологическая модель состоит из соединенных между собой сложных компонентов ($/, k$), каждый из которых представляет собой блок с одним или несколькими входами, образованными попарно сгруппированными выводами, отходящими от блока и заканчивающимися полюсами: $a-b, \dots, p-r, \dots, m-n, \dots$ и т.д. Все компоненты модели нумеруют в виде $1, \dots, j, \dots, k$, а входы каждого $/$ -го компонента нумеруют $1, \dots, i, \dots, j, \dots$ и т.д. При этом каждому i -му входу компонента ставят в соответствие две физические переменные: потенциальную x и потоковую Ψ .



- Различают активные и пассивные компоненты.
- **Активные** компоненты моделируют внешние воздействия и содержат внутри себя независимые источники потенциальных и потоковых переменных.
- Для каждого l -го активного компонента существуют зависимости между его переменными вида $x_i^l = X_i^l + z_i^l \cdot \Psi_i^l$ (для потенциальной переменной i -го входа); $\Psi_i^l = \Psi_j^l + y_i^l x_i^l$ (для потоковой переменной i -го входа), где Ψ_i^l, X_i^l - — заданные значения воздействий.



Все вершины нумеруются и каждой вершине ставится в соответствие входная, выходная или промежуточная переменные. При этом выходная переменная может быть упомянута только один раз и в ее вершину должен быть хотя бы один вход; переменный параметр вершины передается по направлению, указанному стрелками дуг; каждой дуге соответствует оператор преобразования fV_o ; переменную вершины получают сложением переменных по входящим дугам.

Сложная структурная модель в виде направленного графа может быть упрощена по правилам его преобразования.



Морфологическая модель процесса передачи перекрестной помехи представлена на рис. 1.4, б. В этом процессе выделены три части цепи пассивного проводника, воспринимающего помеху: сам проводник, моделируемый двумя источниками E и I (компонент 1), выход передающей логической схемы (компонент 2), моделируемый элементами с C_1 , и G_1 , (см. верхний четырехполюсник на рис. 1.4, в) и вход принимающей логической схемы (компонент 3), моделируемый элементами с C_2 и G_2 (см. нижний четырехполюсник на рис. 1.4, в).

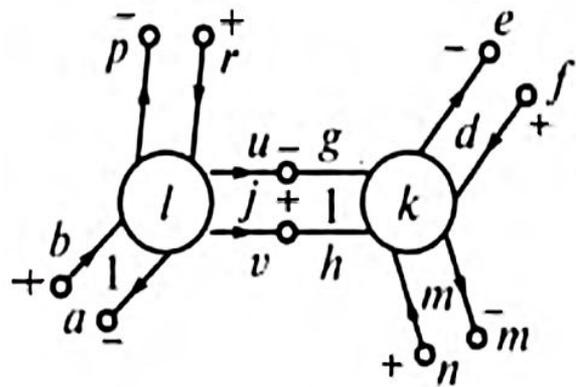


Последовательное включение компонента 2 связано с возможностью исследования действия помехи, моделируемой компонентом 7, совместно с прохождением основного сигнала, моделируемого компонентом 4. При подключении последнего переключка между полюсами 1 и 2 отсутствует и цепочка $C_1 - G_1$, будет являться выходным сопротивлением источника сигнала $U_{\text{вых}}$ (потенциальной переменной X_l^4 компонента 4). Тогда очевидно, что матрица проводимостей $y^{(2)}$ четырехполюсного компонента 2 и матрица сопротивлений $z^{(3)}$ четырехполюсного компонента 3 будут иметь следующий вид:

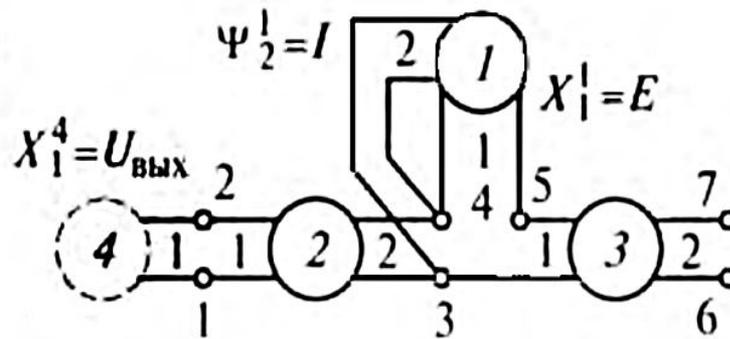


$$y^2 = \begin{vmatrix} G_1 + sC_1 & G_1 + sC_1 \\ G_1 + sC_1 & G_1 + sC_1 \end{vmatrix} \quad z^3 = \begin{vmatrix} \frac{1}{G_2 + sC_2} & \frac{1}{G_2 + sC_2} \\ 1 & 1 \\ \frac{1}{G_2 + sC_2} & \frac{1}{G_2 + sC_2} \end{vmatrix}$$

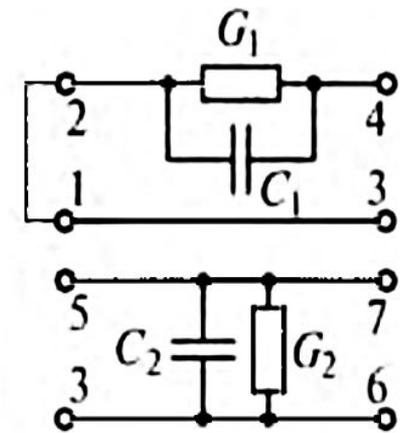
Полученную в результате расчета по морфологической модели разность потенциалов на выходах 6 — 7 компоненты 3 (т.е. на входе принимающей логической схемы 2, рис. 3.1, а) сравнивают с допустимым значением. В случае превышения этого значения принимают решение о разнесении проводников на поверхности печатной платы.



a



б.



в

Рис. 1.4. Общий вид электрической морфологической модели (а), модель цепи передачи перекрестной помехи (б) и элементы морфологической модели (в)



Таким образом, реализуя тот или иной вид моделирования, можно ограничиться аналитической связью входных и выходных переменных, рассмотреть причинно-следственные связи внутренних переменных, изучить конкретное физическое поле распределения потенциальной переменной в дискретных точках схемы или конструкции и, наконец, разделить физический процесс на составные части согласно закономерностям строения схемы или конструкции.



Вероятностные модели

Под **вероятностной** будем понимать модель, в которой все или хотя бы некоторые переменные принимают случайные значения или являются их функциями, для описания которых необходим математический аппарат теории вероятностей и математической статистики.



- Построение и исследование вероятностных моделей конструкций РЭУ является одним из этапов их проектирования.
- При этом в практике проектирования вероятностные модели используют для описания производства как системы массового обслуживания, в задачах расчета показателей надежности РЭС и при обработке экспериментальных результатов.



Производство как система массового обслуживания

- Практически любой технологический процесс можно представить в виде системы, на вход которой, соблюдая определенную **дисциплину очереди**, поступает **поток заявок** на обслуживание.
- По истечении **времени ожидания** и через некоторое **время обслуживания** на выходе появляется **выходной поток** обслуженных заявок, принявших **новый вид** в соответствии с алгоритмом и качественным содержанием обслуживания.
- Совокупность этих процедур и их параметров принято называть **системой массового обслуживания**.



В общем случае для принятой дисциплины очереди моменты поступления заявок, время ожидания и обслуживания имеют случайные значения. Методы количественной оценки значений параметров их распределения дает теория массового обслуживания. **Системы массового обслуживания** подразделяются по числу обслуживаемых потоков заявок (одноканальные и многоканальные), дисциплине очереди (упорядоченные и неупорядоченные), времени ожидания (с ожиданием и с отказами на обслуживание), числу пунктов обслуживания (с ограниченным и неограниченным числом обслуживающих аппаратов).



Для описания потока заявок, времени ожидания и обслуживания используют соответствующие функции распределения $P\{t\}$ длительности интервалов между событиями входного потока и длительности интервала ожидания или обслуживания либо соответствующую функцию плотности $f(t)$. Чаще всего используют экспоненциальный закон распределения: $P(t) = \exp(-\lambda t)$; $f(t) = -P'(t) = \lambda \exp(-\lambda t)$, где λ — параметр потока.



Это распределение характеризует простейший (пуассоновский) поток, обладающий свойствами стационарности ($\lambda, = \text{const}$), ординарности (вероятность появления двух и более событий в интервале Δt равна нулю) и отсутствия последствия (вероятность появления события в интервале t , следующем за интервалом Δt , не зависит от вероятности появления события в интервале Δt). Кроме того, в приложениях используют другие типы потоков: Пальма, Эрланга, Бернулли и просеянные, свойства и параметры которых отличны от свойств и параметров простейшего потока.



Модели РЭС в задачах расчета надежности

Надежность — это свойство изделий сохранять свою работоспособность в течение заданного времени в заданных условиях эксплуатации.

Одним из фундаментальных понятий в теории надежности является понятие **отказа** — события, наступившего через некоторое **время безотказной работы** изделия и характеризующего его неработоспособное состояние. Работоспособность отказавшего изделия может быть восстановлена через некоторое **время восстановления**. Совокупность многих циклов отказ — восстановление до полного износа изделия образует его **ресурс**, а способность изделия сохранять свою работоспособность в нерабочем состоянии характеризует его **ресурс хранения**.



Для любого изделия время безотказной работы, время восстановления работоспособности, функциональный ресурс и ресурс хранения имеют случайные значения. Методы их количественной оценки дает теория надежности.

Поток отказов описывают следующими распределениями:

- экспоненциальным $P(t) = \exp(-\lambda t)$;
- Вейбулла $P(t) = \exp(-\lambda t^\delta)$,



нормальным и логарифмически нормальным, функции плотности которых $f(t)$ и $f(z)$ соответственно имеют вид:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_t} \exp \left\{ - \left(\frac{(t - m\{\tilde{t}\})}{\sqrt{2}\sigma_t} \right)^2 \right\};$$

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp \left\{ - \left(\frac{(z - m\{\tilde{z}\})}{\sqrt{2}\sigma_z} \right)^2 \right\};$$

где λ , σ — параметры; σ_t , $m\{\tilde{t}\}$ и σ_z , $m\{\tilde{z}\}$ — соответственно среднеквадратичные отклонения и математические ожидания случайных значений \tilde{t} и \tilde{z} ; $Z = \lg t$.



- При этом экспоненциальное распределение является моделью безотказности «нестареющих» элементов.
- С помощью распределения Вейбулла моделируют отказы на различных стадиях цикла жизни изделий.
- Нормальное распределение является моделью безотказности «стареющих» элементов, а с помощью логарифмически нормального распределения моделируют отказы из-за усталости и износа материалов конструкций.



Методы обработки экспериментальных данных

Известно, что находящееся в пределах допуска значение электрического параметра отдельного ЭРК (сопротивление резистора, емкость конденсатора, коэффициент передачи тока транзистора и др.) имеет случайное отклонение от его номинального значения. Вся совокупность значений параметра данного номинала может быть описана вероятностной моделью в виде функций распределения или плотности. Знание этих функций и их параметров способствует выявлению производственного брака. Эти функции строят в статистическом виде на основе данных измерения, полученных для партии однотипных изделий.



Расхождение между истинным распределением и его статистическим представлением при увеличении объема экспериментальных данных стремится к нулю. Следовательно, в случае когда статистическое распределение построено по ограниченному объему экспериментальных данных, необходимо оценить вероятность ошибки, которая при этом может быть допущена. Так как истинное распределение часто неизвестно, то оценивают сходимость статистического распределения и одного из известных теоретических распределений. Кроме указанных ранее распределений при этом используют равномерное распределение, распределение Рэля и u -распределение.



Для построения статистического распределения

результаты наблюдений x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) располагают в порядке возрастания (убывания) значений, образуя вариационный ряд. При большом числе значений ($n > 100$) строят статистический ряд, для чего фиксируют значения x_{max} и x_{min} , делят диапазон изменений $[x_{max} - x_{min}]$ на l интервалов $\Delta x_j = x_{j+1} - x_j$, где $j = 1, 2, \dots, l$; $x_{min} = x_1$; $x_{max} = x_{i+1}$) и рассчитывают частоты попадания x_i в j -й интервал:

$$f_j^* = \frac{p_j^*}{\Delta x_j}; \quad p_j^* = \frac{n_j}{n}; \quad \sum_{j=1}^l p_j^* = 1;$$

где p_j^* — оценка парциальной вероятности числа событий в j -м интервале.



- Графическим изображением статистического ряда является гистограмма $f^*(x)$ (рис. 1.5, а) — статистический аналог функции плотности распределения.
- Линия, соединяющая центры плоских вершин каждого отрезка, образует полигон частот.

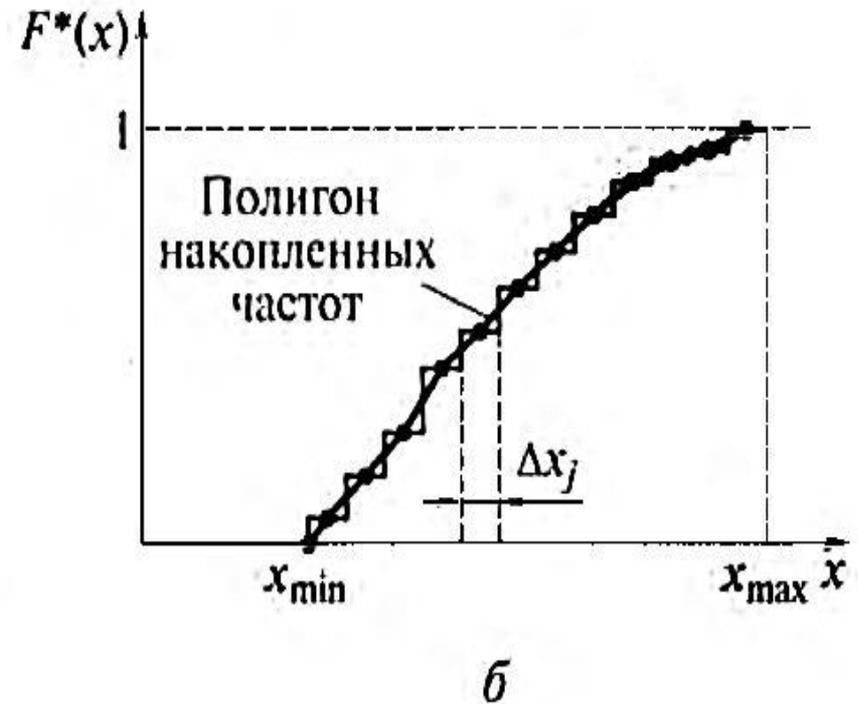
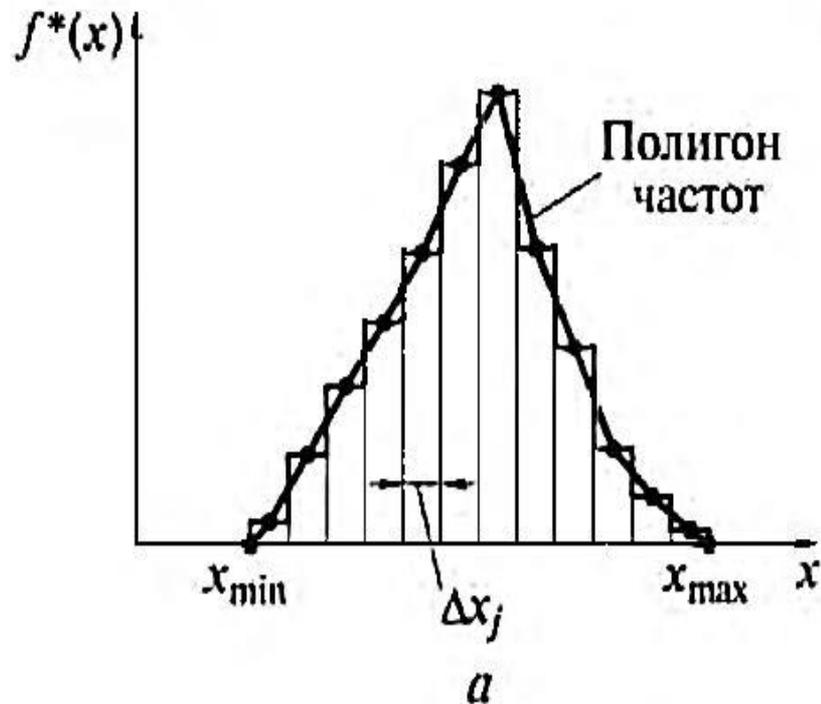


Рис. 1.5. Статистическое представление результатов измерений:
a — гистограмма; *б* — функция накопленной частоты.



Способ группирования значений x , может изменить вид гистограммы. Число интервалов группировки l должно обеспечивать выделение основных свойств распределения (модальности, симметрии, плосковершинности) и нивелирование его случайных колебаний. Поэтому на практике область определения $[x_{\max} \dots x_{\min}]$ делят на l ($l > 5$) интервалов таким образом, чтобы в каждый интервал Δx_j попало не менее пяти результатов наблюдений x_j .

Статистическим аналогом функции распределения является зависимость накопленной частоты вида $F^*(x) = p(X_j < x)$, где $j = 1, 2, \dots, n$ (рис. 3.5, б). При $x < x_{\min}$ функция $F^*(x) = 0$; при $x_{\min} \leq x \leq x_{j+1}$ функция $F^*(x) = i/n$; при $x \geq x_{\max}$ функция $F^*(x) = 1$.



Далее следует процедура выравнивания статистического распределения и представления его в виде аналитической зависимости, т.е. соотнесения по вероятности к одному из известных теоретических распределений по результатам сравнительного анализа параметров теоретического и статистического распределений: значений коэффициентов вариации $v(x)$, асимметрии $As^*(x)$ и эксцесса $\varepsilon^*(x)$.

На практике выбор подходящего теоретического распределения может оказаться ошибочным, особенно при небольшом числе опытов ($n < 100$). Поэтому для выявления этих ошибок после выбора теоретического распределения и вычисления его параметров проверяют степень согласованности теоретического и статистического распределений.



Если величина x подчиняется одному из известных теоретических распределений, то с увеличением числа ее реализаций n статистическое распределение будет сходиться к данному теоретическому распределению, т.е. мера расхождения U между значениями функций плотности $f^*(x)$ и $f(x)$ будет уменьшаться. Сама мера расхождения вида $\sum_{j=1}^n c_j = (p_j - p_j)^2$ (где c_j — весовые коэффициенты) также является случайной, так как при повторении эксперимента U будет меняться из-за изменения частот p_j .



Тогда оценкой согласованности рассматриваемых распределений может быть вероятность того, что только из-за случайных причин, вызванных недостаточным объемом статистического материала, мера расхождения U должна быть не меньше вычисленного в эксперименте значения U , т.е. $p(U > U)$. При больших значениях вероятности можно утверждать, что гипотеза о данном теоретическом распределении не противоречит статистическим данным.



Ответ на вопрос, при каком малом значении $p(\tilde{U} > U)$ следует отвергать гипотезу о принятом теоретическом распределении, является неопределенным. На практике эта вероятность должна быть больше 0,1. Правило, по которому принимают или отклоняют данную гипотезу, называют статистическим **критерием согласия** (χ^2). Построение этого критерия связано с выбором подходящей функции — **статистики критерия** — для меры расхождения U между статистическими и теоретическими значениями.



Рассмотрим кратко критерий согласия Пирсона. В данной критерии в качестве статистики использована функция, в которой весовые коэффициенты $c_j = n/p_j$ и которую называют χ^2 -статистикой Пирсона:

$$\tilde{U} = \chi^2 = n \sum_{j=1}^l \frac{(p_j^* - p_j)^2}{p_j} = \sum_{j=1}^l \frac{(n_j - np_j)^2}{np_j}.$$



2.3 Функции чувствительности

Параметры любого изделия (в том числе и РЭС) в различной степени чувствительны к изменению факторов производства и условий эксплуатации. Так, например, эффективность действия радиолокационной станции зависит от параметров окружающей среды и уровня промышленных помех, а устойчивость функционирования и выходные параметры ИМС зависят от плотности потока радиоактивного излучения. Степень влияния внешних факторов на значения выходных параметров изделия характеризует их параметрическую чувствительность к воздействию этих факторов.



Универсальным показателем ПЧ, принятым в общей теории чувствительности, является количественный показатель в виде частной производной выходного параметра y_j по соответствующему параметру q_k называемый *функцией чувствительности* (ФЧ).



Найдем выражение для вектора приращений Δy в зависимости от вариации Δq вектора внутренних параметров q относительно его начального значения q_0 , сделав допущение о малости вариации $\Delta q = q - q_0$ ($\Delta q = \{\Delta q_1, \Delta q_2, \dots, \Delta q_l\}^T$) и постоянстве значений вектора χ входных воздействий. Тогда j -ю компоненту Δy_j вектора Δy ($\Delta y = y - y_0$) приращений вектора выходных параметров j можно представить рядом Тэйлора, полученным разложением значения y_j в окрестности расчетной точки y_{j0} :

$$\begin{aligned} \Delta y_j &= y_j - y_{j0} \\ &= \sum_{k=1}^L \left(\frac{\partial y_j}{\partial q_k} \right) \Delta q_k + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^L \left(\frac{\partial^2 y_j}{\partial q_k^2} \right) \Delta q_k^2 + \dots + \frac{1}{n!} \sum_{k=1}^L \left(\frac{\partial^n y_j}{\partial q_k^n} \right) \Delta q_k^n. \end{aligned}$$



В силу принятого допущения о малости Δq_k вклад членов ряда, имеющих порядок выше первого, также мал. Тогда, ограничиваясь первым слагаемым, получим:

$$\Delta y_j = \sum_{k=1}^L A_{q_k}^{y_j} \Delta q_k,$$

Где $A_{q_k}^{y_j}$ - ФЧ j -го выходного параметра по k -му внутреннему параметру.

Аналогично для вектора приращений Δy запишем: $\Delta y = A_q^y \Delta q,$



где A_q^y — абсолютная матрица чувствительности, имеющая вид:

$$A_q^y = \begin{vmatrix} A_{q1}^{y1} & \dots & A_{qL}^{y1} \\ \vdots & & \vdots \\ A_{q1}^{yN} & \dots & A_{qL}^{yN} \end{vmatrix}.$$

Получение конкретных значений элементов абсолютной матрицы чувствительности возможно при наличии соответствующих моделей.



Контрольные вопросы

1. Дайте определение сложной системы. Приведите примеры и обоснуйте принадлежность к сложным системам радиотехнических, конструкционных, транспортных, биологических и социальных систем.
2. Может ли быть неполной матрица абсолютной чувствительности?
3. Что такое область работоспособности изделия?
4. Как проявляется воздействие на параметры РЭС факторов производства?
5. Как проявляется воздействие на параметры РЭС факторов условий эксплуатации?
6. Чем отличаются детерминированные модели от вероятностных?



Контрольные вопросы

7. В чем проявляется топологическое свойство конструкций РЭС?
8. Обладают ли топологическим свойством паразитные параметры ЭРК?
9. Почему для оценки показателей надежности РЭС необходимы вероятностные модели их функционирования?
10. В чем состоит разница между теоретическим, статистическим и истинным распределениями случайного значения параметра?
11. Что является обязательным для процедуры оптимизации параметра процесса или изделия?