

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

«Воронежский государственный технический университет»

Л. Н. Никитин, А. С. Костюков, И. С. Бобылкин

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ
И ИСПЫТАНИЙ РЭС**

Учебное пособие

Воронеж 2020

УДК 658.562(075.8)
ББК 32.884я7
Н624

Рецензенты:

кафедра основ радиотехники и электроники
Воронежского института ФСИИ России
(начальник кафедры полковник внутренней службы
канд. техн. наук, доцент Р. Н. Андреев);
канд. физ.-мат. наук, доцент А. Н. Лукин

Никитин, Л. Н.

Автоматизированные методы диагностики и испытаний РЭС: учебное пособие [Электронный ресурс]. — Электрон. текстовые и граф. данные (4,0 Мб) / Л. Н. Никитин, А. С. Костюков, И. С. Бобылкин. — Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2020. — 1 электрон. опт. диск (CD-ROM): цв. — Систем. требования: ПК 500 и выше; 256 Мб ОЗУ; Windows XP; SVGA с разрешением 1024×768; Adobe Acrobat; CD-ROM дисковод; мышь. — Загл. с экрана.

Н624

ISBN 978-5-7731-0847-4

Учебное издание содержит необходимые теоретические материалы и задания для проведения занятий по дисциплине «Автоматизированные системы диагностики контроля испытаний приборов».

Предназначено для студентов направления 12.03.01 «Приборостроение» (профиль «Приборостроение»).

Ил. 84. Библиогр.: 6 назв.

УДК 658.562(075.8)
ББК 32.884я7

*Издается по решению редакционно-издательского совета
Воронежского государственного технического университета*

ISBN 978-5-7731-0847-4 © Никитин Л. Н., Костюков А. С., Бобылкин И. С., 2020
© ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2020

ВВЕДЕНИЕ

Диагностика и испытания являются составной частью процесса производства радиоэлектронных средств (РЭС). Вероятность безотказной работы РЭС зависит в общем случае от качества диагностирования и испытания, которые формируются в процессе ее изготовления и совершенствуются в процессе эксплуатации.

Предлагаемое издание содержит теоретические и практические материалы по автоматизации диагностики, испытаний и виртуальным методам комплексного анализа тепломеханических характеристик РЭС.

В основу учебного пособия положен опыт, накопленный ведущими специалистами в области диагностики современной техники (разделы 1–5). Приведен систематизированный материал по показателям диагностирования, достоверности диагностирования, часто встречающихся ошибках диагностирования... [1, 2]. Достаточно подробно описываются системы технико-диагностического контроля РЭС и устройства сопряжения объекта со средствами диагностирования [3]. Проектирование нового поколения универсальных устройств, которые позволяют производить автоматизацию диагностики и испытания радиоэлектронных приборов различных типов и в любой последовательности, обеспечивает большой уровень производительности, информативности, а также повышает надёжность электронных средств (разделы 6–7) [4, 5].

Проектирование и создание современной РЭС практически невозможно без предварительной оценки устойчивости её к механическим и тепловым воздействиям. Среди различных методов испытаний одним из перспективных является метод математического моделирования (ММ), который позволяет провести быстро оценку работоспособности устройства, снизить затраты на его конструирование и получить высокую достоверность результатов испытаний (разделы 8–10).

1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ. ОПРЕДЕЛЕНИЯ. ПРОСТЫЕ И СЛОЖНЫЕ ПРИЗНАКИ

При диагностике радиоэлектронных устройств наиважнейшее значение имеет описание объекта в системе критериев, которые обладают высокой диагностической ценностью. Главная мысль, которая представлена в изложенном тексте, звучит как: диагностическую ценность можно определить с помощью информации, которая записывается признаком в системе состояний [1].

Пример: пусть существует система D , которая определена в одном из n возможных состояний. Данную систему можно назвать системой диагнозов, а каждое состояние — это диагноз. В общем случае различные состояния системы представляют собой различную совокупность диагнозов, при этом выбор самих диагнозов всегда определяется характером проводимого эксперимента. Состояние системы D зависит от другой системы, которая взаимосвязана с ней так называемой системой признаков.

Простейшим признаком обычно называют результат исследования, который записывается одним или двоичным значением. Если верить теории информации, то по ней простейший признак — это объект, который имеет свойства системы и который может иметь лишь одно из двух существующих состояний. Он может обозначать как наличие, так и отсутствие изучаемой характеристики в определённом интервале.

Для того чтобы правильно выполнить диагностику, обычно область всевозможных значений разбивают на интервалы; особенностью данных интервалов является то, что в них находится необходимый параметр. Поэтому полученные данные количественного исследования обычно рассматривают как признак, который может принимать несколько значений.

Договоримся обозначить сложным признаком (разряда m) результат исследования, который можно записать m символами. В случае, когда вместо символов используются цифры,

сложный признак можно записать m -разрядным числом. Также сложный признак может иметь связь с исследованием качественного характера, но только в том случае, если конечное значение имеет несколько градаций. Разряды признака обычно называют диагностическим интервалом (ДИ).

Рассмотрим некоторые из представленных признаков.

Одноразрядный признак ($m = 1$) может находиться только в одном состоянии. Данный признак обычно не имеет какой-либо полезной информации, и поэтому его часто исключают из исследования.

Двухразрядный признак может находиться в двух состояниях, которые обычно обозначаются k_{j1} , k_{j2} .

В трехразрядный признак может входить несколько различных значений k_{j1} , k_{j2} , k_{j3} .

m -разрядный признак может состоять из m -возможных значений $k_{j1} \dots k_{jm}$.

1.1. ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ВЕСА ПРИЗНАКОВ

В случае, когда после исследования было выявлено, что, например, признак k_j равен для изучаемого субъекта k_{js} , то число обычно называют реализацией признака k_j . Если обозначить её как k_{j*} , то $k_{j*} = k_{js}$.

Диагностический вес (ДВ) для определения признака k_j для диагноза D_i записать как

$$Z_{D_i} = Z_{D_i}(k_{js}) = \log_2 \frac{P(D_i/k_{js})}{P(D_i)}, \quad (1.1)$$

где $P(D_i/k_{js})$ — вероятность диагноза D_i при условии, что признак k_j получил значение k_{js} ; $P(D_i)$ — априорная вероятность диагноза.

Если учитывать теорию информации, то $Z_{D_i}(k_{js})$ по ней является информацией о состоянии D_i , которую имеет в данный момент признак k_{js} . Вероятность состояний D_i обычно увеличивается, если признак k_j реализован в интервале s ,

то есть $[P(D_i/k_{js}) > P(D_i)]$. Также следует отметить, что ДВ для случаемого интервала признака имеет положительную оценку, то есть $Z_{D_i}(k_{js}) > 0$. В случае когда присутствие параметра на интервале s никоим образом не меняет вероятность диагноза, то $Z_{D_i}(k_{js}) = 0$, так как $P(D_i/k_{js}) = P(D_i)$. Следует также помнить, что ДВ интервала s признака k_j может иметь и отрицательный знак. Диагностический вес наличия признака k_j в интервале s можно представить как

$$Z_{D_i}(k_{js}) = \log_2(P(k_{js}/D_i)/P(k_{js})), \quad (1.2)$$

где $P(k_{js}/D_i)$ — вероятность появления интервала s признака k_j для объектов с диагнозом D_i ; $P(k_{js})$ — вероятность появления этого интервала у всех объектов с различными диагнозами.

Эквивалентность уравнений (1.1) и (1.2) получается из

$$P(k_{js}) P(D_i/k_{js}) = P(D_i) P(k_{js}/D_i) = P(k_{js} | D_i). \quad (1.3)$$

1.2. СВЯЗЬ ДВ РЕАЛИЗАЦИЙ ПРОСТОГО ПРИЗНАКА

Признак k_j простого вида можно выразить двумя способами:

$k_{j1} = k_j$; $k_{j2} = \bar{k}_j$ (k_j — наличие признака; \bar{k}_j — отсутствие признака).

Благодаря этой связи можно судить: присутствует признак или нет. ДВ наличия признака k_j для диагноза D_i :

$$Z_{D_i}(k_j) = \log_2[P(k_j/D_i)/P(k_j)]; \quad (1.4)$$

ДВ отсутствия признака:

$$\bar{Z}_{D_i}(k_j) = \log_2[\bar{P}(k_j/D_i)/\bar{P}(k_j)]; \quad (1.5)$$

Так как существуют очевидные соотношения:

$$P(\bar{k}_j) = 1 - P(k_j); \quad (1.6)$$

$$\bar{P}(k_j/D_i) = 1 - P(k_j/D_i), \quad (1.7)$$

то

$$\begin{aligned} Z_{D_i}(k_j) &= \log_2([1 - P(k_j/D_i)]/[1 - P(k_j)]) = \\ &= \log_2([1 - P(k_j)]2Z_{D_i}(k_j)/[1 - P(k_j)]). \end{aligned} \quad (1.8)$$

Из формулы (1.8) вытекает, что $Z_{D_i}(k_j)$ и $Z_{D_i}(\bar{k}_j)$ всегда имеют равные знаки.

Если признак k_j является случайным для данного диагноза [$P(k_j/D_i) = P(k_j)$], то оба ДВ равны нулю.

1.3. УСЛОВНЫЙ И НЕЗАВИСИМЫЙ ДВ

С помощью уравнений (1.1) и (1.2) можно определить независимый ДВ для диагноза D_i . Он обычно проявляется в случаях, когда признак k_j изучают в первый раз, либо когда результаты эксперимента по другим признакам ещё не получены.

Также независимый ДВ может проявляться в тех случаях, когда вероятность появления изучаемой реализации не зависит от полученных значений предыдущих экспериментов. Но следует помнить, что диагностическое значение реализации признака обычно зависит от того, какие именно реализации признаков были получены в предшествующих экспериментах.

Следует помнить о таких случаях, когда признак не имеет никакого значения, но при этом он помогает точно определить диагноз.

1.4. ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ ВЕС РЕАЛИЗАЦИИ КОМПЛЕКСА ПРИЗНАКОВ

Диагностический вес реализации комплекса признаков независим от порядка выполнения экспериментов — данное правило работает и для нескольких комплексов признаков. Следует помнить, что термин диагностического веса реализации признака может быть введен в обращение в случае изучения конкретного диагноза и служит для его обоснования или же опровержения.

Если же применить способ для утверждения значения ДВ ко всем реализациям признака и ко всем диагнозам, то это порождает термин информативной или же диагностической ценности обоснования (ДЦО).

1.5. ДЦО

Частная ДЦО

Следует помнить, что ДВ сам по себе не способен дать конкретной информации о ДЦО. Приведем пример: отсутствие ДВ конкретно говорит о наличии ДЦО в изучаемом признаке, а вот при присутствии ДВ нельзя утверждать однозначно. При этом существует определённое правило, согласно нему учитывать ДЦО по какому-либо признаку при изучении диагноза следует по величине информации, которая записывается всеми реализациями признака и служит для того, чтобы правильно установить диагноз.

Иначе говоря, ДЦО позволяет принимать все изучаемые реализации признака и приводится в виде матожидания числа информации, вносимой отдельными реализациями.

$$Z_{D_i}(k_j) = \sum_{S=1}^m P(k_{js}/D_i) Z_{D_i}(R_{js}), \quad (1.9)$$

где R_{js} — признак; D_i — диагноз.

Частотой ДЦО по признаку k_j называется величина $Z_{D_i}(R_i)$, которая при этом имеет связь только с диагнозом D_i . Данная величина определяет именно независимую ДЦО. $Z_{D_i}(k_j)$ используется в тех случаях, когда эксперимент проходит первым или же значения ранее проводимых экспериментов ещё не получены. Данная характеристика обычно приводится в трёх формах:

$$Z_{D_i}(k_j) = \sum_{S=1}^m P(k_{js}/D_i) \log_2 [P(k_{js}/D_i) / P(k_{js})]; \quad (1.10)$$

$$Z_{D_i}(k_j) = \sum_{S=1}^m P(k_{js}/D_i) \log_2 [P(D_i/k_{js}) / P(D_i)]; \quad (1.11)$$

$$Z_{D_i}(k_j) = \sum_{S=1}^m P(k_{js}/D_i) \log_2 [P(D_i k_{js}) / P(D_i) P(k_{js})]. \quad (1.12)$$

1.6. ДЦО ДЛЯ ПРОСТОГО ПРИЗНАКА

$$\begin{aligned} Z_{D_i}(k_j) &= P(k_j/D_i) \log_2 [P(k_j/D_i) / P(k_j)] + \\ &+ P(\bar{k}_j/D_i) \log_2 [P(\bar{k}_j/D_i) / P(\bar{k}_j)] = \\ &= P(k_j/D_i) \log_2 [P(k_j/D_i) / P(k_j)] + \\ &+ [1 - P(k_j/D_i)] \log_2 ([1 - P(k_j/D_i)] / [1 - P(k_j)]). \end{aligned} \quad (1.13)$$

В случае когда признак k_j получен случайно в ходе изучения диагноза D_i при $P(k_j / D_i) / P(k_j) = 1$, то эксперимент по данному признаку в этом случае без ДЦО ($Z_{D_i}(k_j) = 0$). Эксперименты могут иметь большую ДЦО или их признаки часто выплывают при данном диагнозе, но при других диагнозах они появляются редко. Данное правило работает и в обратную сторону, то есть признаки мало появляются при изучаемом диагнозе, но при этом в других диагнозах данный признак встречается часто. ДЦО будет отсутствовать в том случае, если $P(k_j / D_i) = P(k_j)$. Обычно ДЦО записывается в виде двоичных или битов и при этом не может иметь отрицательный знак.

1.7. ВЫБОР ВЕЛИЧИНЫ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ИНТЕРВАЛОВ

Параметр $Z_{D_i}(k_j)$ используется не только для обоснования эффективности эксперимента, но и для правильного подбора числа разрядов. Наиболее понятно, что при уменьшении числа разрядов будет уменьшаться и сложность в реализации диагностики, однако за этим может последовать и уменьшение ДЦО.

ДЦО возрастает вдвое при переходе от двух ДИ к четырём, а дальнейшее увеличение уже не приводит к возрастанию $Z_{D_i}(k_j)$. Этот результат имеет общий характер. С увеличением числа ДИ увеличивается (или остается прежней) ДЦО, но при этом изучение полученных данных будет более сложным. Нужно помнить, что при большом количестве чисел разряда потребуется изучение большого количества материала. Это необходимо для того, чтобы достоверность данных вероятностей интервалов была актуальной.

1.8. ОБЩАЯ ДЦО

Эксперимент, обладающий малой ценностью для определённого диагноза, может при этом быть очень важным для другого диагноза. Необходимо определить значения общей ценности по признаку k_j для всей системы, определяемые объёмом информации, которые используются экспериментом в системе диагнозов

$$\begin{aligned} Z_D &= \sum_{i=1}^n P(D_i) Z_{D_i}(k_j) = \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{s=1}^m (D_i) P(k_{js}/D_i) \log_2 [P(k_{js}/D_i) / P(k_{js})]. \end{aligned} \quad (1.14)$$

Параметр $Z_D(k_j)$, по сути, является значением информации, используемым в эксперименте для ранее неизвестного диагноза, который был взят из изучаемой совокупности диагнозов.

1.9. ДЦО ПО КОМПЛЕКСУ ПРИЗНАКОВ

Общая ДЦО

Сперва изучим случай, когда комплекс признаков K имеет в своём составе k_1 и k_2 , которые, в свою очередь, состоят из m_1 и m_2 разрядов. Условимся, что данные эксперимента по признаку k_1 неизвестны и необходимо узнать ДЦО по одновременному изучению k_1 и k_2 .

Ценность для данной системы диагнозов можно измерить объёмом информации, которая записывается системами k_1 и k_2 в систему D :

$$Z_D(k_1k_2) = H(D) - H(D/k_1k_2), \quad (1.15)$$

где $H(D)$ — априорная энтропия системы диагнозов; $H(D/k_1k_2)$ — ожидаемая энтропия системы диагнозов после обследования по признакам k_1 и k_2 .

Учитывая равенство

$$H(Dk_1k_2) = H(k_1) + H(k_2/k_1) + H(D/k_1k_2), \quad (1.16)$$

получим

$$Z_D(k_1k_2) = H(D) + H(k_1) + H(k_2/k_1) - H(Dk_1k_2). \quad (1.17)$$

Установим следующее важное равенство:

$$Z_D(k_2/k_1) = H(D/k_1) - H(D/k_1k_2). \quad (1.18)$$

Коэффициент $H(D/k_1)$ является вероятным числом энтропии комплекса диагнозов после пройденного эксперимента по признаку k_1 , при этом точное число реализаций признака k_1 не нужно. Коэффициент $Z_D(k_2/k_1)$ представляет с собой разность средних чисел энтропии после эксперимента по признаку k_1 и после изучения системы признаков k_1 и k_2 .

Частная ДЦО

Рассчитаем частную ДЦО для системы признаков k_1 и k_2 , которые входят в диапазон D_i :

$$Z_D(k_2, k_1) = \sum_{i=1}^n P(D_i) Z_{D_i}(k_1, k_2). \quad (1.19)$$

В соответствии с этим равенством частная ДЦО:

$$Z_{D_i}(k_1, k_2) = \sum_{s=1}^{m_1} \sum_{p=1}^{m_2} P(k_{1s}, k_{2p} / D_i) \log_2 \left(\frac{P(k_{1s}, k_{2p} / P_i)}{P(k_{1s}, k_{2p})} \right) \quad (1.20)$$

Будем считать признаки k_1 и k_2 независимыми при

$$P(k_{2p} / k_{1s}) = P(k_{2p}) \quad (1.21)$$

и условно независимыми для диагноза D_i при

$$P(k_{2p} / D_i, k_{1s}) = P(k_{2p} / D_i). \quad (1.22)$$

Если признаки k_1 и k_2 удовлетворяют условиям (1.21) и (1.22) сразу, то

$$Z_{D_i}(k_1, k_2) = Z_{D_i}(k_2), \quad (1.23)$$

тогда

$$Z_D(k_1, k_2) = Z_D(k_1) + Z_D(k_2). \quad (1.24)$$

Общий случай

Выше была представлена система из двух признаков, так для системы Y признаков

$$Z_D(k) = Z_D(k_1, k_2, \dots, k_Y) = Z_D(k_1) + Z_D(k_2 / k_1) + \quad (1.25)$$
$$+ Z_D(k_3 / k_1, k_2) + \dots + Z_D(k_Y / k_1, k_2, \dots, k_{Y-1}).$$

1.10. ДЦО ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ ПРОВЕДЕНИИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Общая ДЦО

Изучим ценность согласно k_2 , но условимся, что числовые значения эксперимента по признаку k_1 уже получены. Тогда ДЦО данного эксперимента, если учитывать все возможные решения признака k_1 , можно рассчитывать согласно выражению (1.18), которое можно преобразовать к виду:

$$Z_D(k_2, k_1) = \sum_{s=1}^{m_1} P(k_{1s}) Z_D(k_2 / k_{1s}), \quad (1.26)$$

где условная ДЦО k_2 :

$$Z_D(k_2 / k_{1s}) = H(D / k_{1s}) - H(D / k_{1s}, k_2). \quad (1.27)$$

В другой форме уравнение (1.27) будет таким:

$$Z_D(k_2, k_1) = \sum_{i=1}^h \sum_{p=1}^{m_2} P(D_i, k_{2p} / k_{1s}) \log_2 [P(k_{2p} / D_i, k_{1s}) / P(k_{2p} / k_{1s})]. \quad (1.28)$$

Частная ДЦО

Теперь можно записать выражение для частной условной ДЦО по признаку k_2 для диагноза D_i :

$$\begin{aligned} Z_D(k_2, k_{1s}) &= \sum_{i=1}^h P(D_i / k_{1s}) Z_{D_i}(k_2 / k_{1s}) = \\ &= \sum_{p=1}^{m_2} P(k_{2p} / D_i, k_{1s}) \log_2 [P(k_{2p} / D_i, k_{1s}) / P(k_{2p} / k_{1s})]. \end{aligned} \quad (1.29)$$

Если признаки k_2 и k_1 диагностически независимы

$$P(k_{2p} / k_{1s}) = P(k_{2p}); \quad (1.30)$$

$$P(k_{2p}/D_i k_{1s}) = P(k_{2p}/D_i), \quad (1.31)$$

то

$$Z_{D_i}(k_2/k_{1s}) = Z_{D_i}(k_2). \quad (1.32)$$

Общий случай

Такие значения легко можно объяснить, когда эксперимент выполняется сразу после получения данных по эксперименту по системе признаков K , в которую входят признаки k_1 и k_2 .

Для проведённого эксперимента по признаку k_3 необходимо учитывать:

$$Z_D(k_3/K^*) = \sum_{i=1}^n \sum_{r=1}^{m_3} P(D_i k_{3r}/k_{1s} k_{2p}) \log_2 [P(k_{3r}/D_i k_{1s} k_{2p}) / P(k_{3r}/k_{1s} k_{2p})]; \quad (1.33)$$

$$Z_{D_i}(k_3/K^*) = \sum_{r=1}^{m_3} P(k_{3r}/D_i k_{1s} k_{2p}) \log_2 [P(k_{3r}/D_i k_{1s} k_{2p}) / P(k_{3r}/k_{1s} k_{2p})], \quad (1.34)$$

где $k_{1s} k_{2p} = K^*$ — реализации комплекса признаков K .

Если эксперимент по системе признаков k_m был рассчитан и необходимо определиться с системой для одновременного изучения k_m с наибольшей ценностью, то следует принять во внимание:

$$Z_D(K_m/K^*) = Z_D(k_1/K^*) + Z_D(k_2/K^* k_1) + \dots + Z_D(k_m/K^* k_1 k_2 \dots k_{m-1}). \quad (1.35)$$

Построение оптимального диагностического процесса

При определении диагностики очень важным остаётся правильно выбрать наиболее полные признаки для наглядности объекта. Во многих случаях это связано с трудностью получения самой информации. В других случаях имеют значение затраченное на исследование время и стоимость диагностического оборудования.

В случае если эксперимент был проведён в последовательном порядке согласно признакам k_α и k_β , то для правильного расчёта необходимо учитывать:

$$\begin{aligned} & Z_D(k_\alpha) + Z_D(k_\beta/k_\alpha^*) + Z_D(k_\gamma/k_\alpha^*k_\beta^*) + \dots] / \\ & / (c_\alpha + c_\beta + c_\gamma + \dots), \end{aligned} \quad (1.36)$$

где k_α^* , k_β^* — реализации признаков k_α , k_β .

Однако при построении оптимального процесса имеются различные трудности, например реализация признаков заранее неизвестны, а решение такой задачи на каждом этапе имеет вероятностный характер. Выбор диагностического комплекса и первоначальный план обследования составляются из условия максимума:

$$\begin{aligned} & Z_D(k_\alpha) - Z_D(k_\beta/k_\alpha) + Z_D(k_\gamma/(k_\alpha k_\beta)) + \dots] / \\ & / (c_\alpha + c_\beta + c_\gamma + \dots). \end{aligned} \quad (1.37)$$

В данном уравнении находится матожидание ДЦО. Самым первым происходит изучение по признаку с наиболее частым коэффициентом оптимальности. Уравнение (1.36) является актуальным для системы одновременных исследований, только когда был проведён весь комплекс исследований и получены соответствующие данные или же когда необходимо досрочно изучить состав данной системы. На практике обычно используют процесс, который наиболее оптимален и предугадывает некоторые действия наперёд.

В качестве примера можно привести, что первый эксперимент правдоподобен с наибольшим коэффициентом оптимальности

$$\lambda = Z_D(k_\alpha) / c_\alpha. \quad (1.38)$$

Под вторым номером обычно идёт исследование, при котором максимум

$$\lambda = Z_D(k_\beta^* / k_\alpha) / c_\beta, k_\alpha^* k_\beta^* \quad (1.39)$$

и т. д.

Для двухшагового процесса исходим из величин:

$$\lambda = [Z_D(k_\alpha) + Z_D(k_\alpha/k_\beta)] / (c_\alpha + c_\beta); \quad (1.40)$$

$$\lambda = [Z_D(k_\alpha/k_\beta^*) + Z_D(k_\gamma / k_\alpha^* k_\beta)] / (c_\beta + c_\gamma). \quad (1.41)$$

Процесс, состоявший из двух шагов, в сравнении с более простым, имеет ряд преимуществ, например, с помощью него можно выбрать лучшую очередность эксперимента, так как позволяет брать в расчёт не только ДЦО обобщённого эксперимента, но и также предсказывать, какой будет выигрыш от его сочетания с последующими.

Если в ходе экспериментов было установлено, что выигрывает диагноз D, то все последующие эксперименты будут нужны лишь для его подтверждения, при этом наиболее удобно будет учитывать ДЦО именно этого диагноза.

2. ПОКАЗАТЕЛИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ. ДОСТОВЕРНОСТЬ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И ЕЁ РАСЧЁТ

2.1. ПОКАЗАТЕЛИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Организация технического диагностирования сложных систем — это важная часть для организации ремонтпригодности и технического обслуживания изделия, в связи с этим некоторые характеристики, служащие для определения надёжности приборов, могут одновременно быть как параметрами данных устройств, так и объекта технического диагностирования (ТД).

Также диагностирование объекта может происходить в системах ТД, а это значит, что некоторые характеристики системы и объекта диагностирования невозможно рассматривать друг без друга.

Показатели РЭС в качестве объекта ТД можно подразделить по следующим характеристикам:

- необходимость РЭС в ТД;
- возможность диагностики РЭС;
- возможность приспособить конструкцию РЭС к диагностике.

Потребность радиотехники в ТД обычно определяется стратегией технического обслуживания ремонта, в ходе которого и происходит управление техническим состоянием устройства.

Характеристиками объекта являются:

T_D — период проведения диагностики;

τ_D — время для проведения диагностики, рассчитывается как $\tau_D = f(T_0)$.

Диагностику РЭС можно описать с помощью параметров, допусков и произведений, которые позволяют определять техническое состояние РЭС.

Самой главной характеристикой для диагностики является совокупность показателей, с помощью которых можно контролировать работоспособность. Численно данный параметр можно рассчитать с помощью множества параметров $U_p = U(U_1 \dots U_n)$ и коэффициентом полноты проверки работоспособности — КПП. Сам КПП $= \lambda_k / \lambda_o$, где λ_k — общая сумма потока отказов составных частей устройства; λ_o — общая сумма отказов всех составных частей прибора.

Для точного поиска места отказа во время диагностики необходимо учитывать глубину поиска дефекта с заданным указанием составной части объекта диагностики или её участка. С помощью чего определяется местоположение предполагаемого дефекта. Численно глубину поиска дефекта можно представить как

$$K_{гп} = F/R, \quad (2.1)$$

где F — число однозначно различимых составных частей объекта на принятом уровне деления; R — общее число составных частей объекта.

Диагностика для расчёта надёжности и определения места отказа может характеризоваться такими параметрами, как:

L — длина диагностики, которую можно рассчитать с помощью элементарных тестовых действий;

$P_{i,j}$ — вероятность появления ошибки при диагностике;

(i,j) — вероятность того, что два события наступят одновременно. Например: устройство в ходе диагностики испытывает состояние i , а по окончании диагностики переходит в состояние j ;

D — вероятность правильного исхода диагностики.

Параметры диагностики следует правильно нормировать согласно условию для обеспечения максимальной эффективности, когда необходимо сравнить различные системы диагностики.

Лучший порядок параметров диагностики можно представить как:

1. Вероятность появления ошибки при диагностике (i,j) , где $P_{i,j}$ — это вероятность одновременного появления двух событий, при которых во время диагностики прибор пребывает в состоянии i , а после диагностики переходит в состояние j .

2. Апостериорная вероятность появления ошибки при диагностике — это вероятность того, что в ходе прохождения диагностики объект находится в состоянии i , но при условии, что полученные данные диагностики будут в состоянии j .

3. Вероятность того, что диагностика будет проведена нормально, D — вероятность того, что диагностика правильно определит техническое состояние устройства.

4. Среднее время диагностики τ_D — МО при одиночной диагностике.

5. Средняя цена диагностики C_D — МО, цена одного диагностирования.

6. Количество затрачиваемого труда на диагностику W_D — МО для диагностирования.

7. Глубина поиска места неисправности L — это параметр, при котором задаётся точное местоположение поиска неисправностей.

2.2. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Определение параметров диагностики является важной задачей для оценки адекватности диагностирования РЭС. Основными параметрами для данного действия являются показатели пребывания устройства в нужном состоянии.

Каждый показатель диагностирования определяется с помощью соответствующих выражений при определенных данных.

Вероятность ошибки диагностирования вида (i,j) :

$$P_{i,j} = P_i \sum_{l=1}^k P_l P_{i,j,l} = \sum_{l=1}^k P_i P_{j,l} P_{i,j,l} , \quad (2.2)$$

где k — число состояний средств диагностирования; P_i — априорная вероятность нахождения объекта диагностирования в состоянии i ; P_1^c — априорная вероятность нахождения СрДк в состоянии l ; $P_{i,j,l}$ — условная вероятность того, что в результате диагностирования ОД признан находящимся в состоянии i , а СрДк — в состоянии l ; $P_{j,l}^A$ — условная вероятность получения результата: «ОД в состоянии j » при условии, что СрДк в состоянии l ; $P_{i,j,l}^B$ — условная вероятность нахождения ОД в состоянии i при условии, что получен результат «ОД в состоянии j », а СрДк находится в состоянии l .

При известных статистических данных оценка вероятности ошибки рассчитывается как

$$P_{i,j}^* = P_i \sum_{l=1}^k P_1^c \tau_{i,j,l} / N_{i,l}, \quad (2.3)$$

где $N_{i,l}$ — общее число испытаний системы диагностирования; $\tau_{i,j,l}$ — число испытаний, при которых система диагностирования зафиксировала состояние j ; вероятности P_i^o и P_l^c определяются методами теории надежности.

2.3. ОШИБКИ В ТРАКТЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ. МЕТОДИКА ИХ РАСЧЕТА

Априорные вероятности принятия решений о работоспособности или неработоспособности состояния объекта соответственно определяются выражениями:

$$P_{(раб)} = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_2(x) dx; \quad (2.4)$$

$$P_{(нераб)} = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_1(x) dx + \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_3(x) dx. \quad (2.5)$$

Ошибка определения параметра в процессе контроля называется при гипотезе H_{10} — ошибка 1-го рода и обозначается символом α , а при гипотезе H_{01} — ошибка 2-го рода с обозначением β .

Ошибки 1-го и 2-го рода могут возникать в РЭС не только в результате погрешностей измерений, но и вследствие других факторов, главными из которых являются: недостаточная полнота контроля, замена совокупности зависимых ДП совокупностью независимых, ошибка в задании областей допусков.

Если состояние РЭС определяется совокупностью ДП – $V(n)$, то условие работоспособности записывается $V(n) \in Sp(n)$. На практике n -мерный вектор ДП заменяется m -мерным вектором $V(m)$, где $m < n$. Условие работоспособности принимает вид $V(m) \in Sp(m)$; в результате возникает методическая ошибка контроля 2-го рода

$$\beta = P\{V(m) \in Sp(m) / V(n) \notin Sp(n)\}. \quad (2.6)$$

Определение допусковой области $Sp(m)$ предполагает наличие сложных взаимозависимостей $V(m)$ вне ДП. Аналитическое решение этой задачи по установлению или оптимизации допусковой области весьма сложно. Поэтому на практике допускают, что ДП – независимы, на каждый из них назначают свой допуск, и тогда допусковая область $Sp(m)$ заменяет другой областью $Ap(m)$. Многомерная задача превращается в m одномерных задач, но при этом появляются не учитываемые ошибки 1-го и 2-го рода, записываются в виде

$$\alpha_{\text{доп}} = P\{V(m) \notin Ap(m) / V(m) \in Sp(m)\}. \quad (2.7)$$

$$\beta_{\text{доп}} = P\{V(m) \in Ap(m) / V(m) \notin Sp(m)\}. \quad (2.8)$$

Совокупные величины ошибок 1-го и 2-го рода с учетом фактора неполноты контроля записываются следующим образом:

$$\alpha_n = P\{V(m) \notin Ap(m) / V(n) \in Sp(n)\}. \quad (2.9)$$

$$\beta_n = P\{V(m) \in Ap(m) / V(n) \notin Sp(n)\}. \quad (2.10)$$

Если состояние объекта диагностирования определяется совокупностью n независимых ДП и СрДк различает два в степени n состояний ОД, то

$$P_{i,j} = \sum_{i=1}^k P_1 \prod_{v=1}^n f_{i,j,v,l}, \quad (2.11)$$

где $f_{i,j,v,l}$ — функция в различных ситуациях, имеющая различные значения:

1. Если в состоянии i и j ОД параметр v находится в допуске СрДк в состоянии l , то

$$f_{i,j,v,l} = P_v - \alpha_{v,l}, \quad (2.12)$$

где P_v — априорная вероятность нахождения ДП в поле допуска; $\alpha_{v,l}$ — вероятность совместного наступления двух событий: ДП — в поле допуска, а считается находящимся вне поля допуска при таком условии, что средства диагностирования находятся в состоянии l .

2. Если в состоянии i ОД параметр v находится в поле допуска, а в состоянии j — параметр вне поля допуска при условии, что СрДк в состоянии l , то

$$f_{i,j,v,l} = \alpha_{v,l}. \quad (2.13)$$

3. Если в состоянии i ОД параметр v находится вне поля допуска, а в состоянии j параметр v — в поле допуска при условии, что СрДк в состоянии l , то $f_{i,j,v,l} = \beta_{v,l}$, где $\beta_{v,l}$ — вероятность совместного наступления двух событий: ДП v находится вне поля допуска, а его считают находящимся в поле допуска при условии, что средство диагностирования в состоянии l .

4. Если в состоянии i и j ОД параметр v находится вне поля допуска при условии, что СрДк в состоянии 1, то

$$f_{i,j,v,1} = 1 - P_v - \beta_{v,1}. \quad (2.14)$$

Для СДК, предназначенных для проверки работоспособности по альтернативному признаку, то есть при двух различных состояниях ($m = 2$), следует устанавливать индексацию:

$i = 1$ ($j = 1$) — работоспособное состояние,

$i = 2$ ($j = 2$) — неработоспособное состояние.

Тогда $P_{1,2}$ — вероятность ошибки диагностирования вида (1,2) — вероятность совместного наступления двух событий: объект диагностирования находится в работоспособном состоянии, а в результате диагностирования принимается находящимся в нерабочем состоянии. $P_{2,1}$ — соответственно вероятность ошибки диагностирования вида (2,1) — вероятность совместного наступления двух событий: объект диагностирования находится в неработоспособном состоянии, а считается находящимся в работоспособном состоянии.

Вероятности ошибок диагностирования:

$$P_{1,2} = P_1 \sum_{i=1}^k P_1^{C Y} P_{2,1} = \sum_{i=1}^k P_1^{C A B} P_{2,1} P_{1,2}, \quad (2.15)$$

$$P_{2,1} = P_2 \sum_{i=1}^k P_1^{C Y} P_{1,2} = \sum_{i=1}^k P_1^{C A B} P_{1,1} P_{2,1}. \quad (2.16)$$

Вероятность правильного диагностирования

$$D = \sum_{i=1}^m P_{ij} = 1 - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1, i \neq j}^m P_{ij}. \quad (2.17)$$

2.4. ДОСТОВЕРНОСТЬ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Основной физической характеристикой системы диагностирования и контроля является достоверность информации о техническом состоянии РЭС. Достоверность отражает степень доверия потребителя к полученным результатам. Достоверность диагностической информации определяют: точность измерения ДП; глубина контроля; полнота контроля; безотказность и помехозащищенность в работе всех элементов тракта; закономерности изменения ДП и допуски на них; методика измерения ДП; способы накопления, отображения и регистрации результатов диагностирования и контроля; условия ТДК, место проведения диагностирования, требования НТД к объекту, средствам и системе диагностирования.

Достоверность, которую условимся обозначать через P^* , является количественной характеристикой практически достоверного события и характеризует степень нашего доверия к анализируемым материалам. Обычно достоверность берется близкой к 0.9; 0.95; 0.99. Достоверность P^* называется односторонней, так как она характеризует степень нашего доверия к тому, что $Q \geq Q_n$ или $Q \leq Q_v$. Двусторонняя же достоверность P^* характеризует практически достоверное событие, что Q лежит в пределах от Q_v до Q_n .

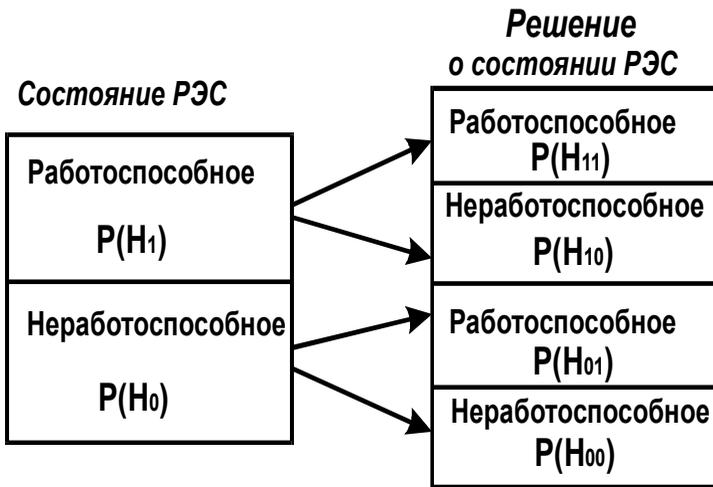
Двусторонняя достоверность несколько меньше односторонней и связана с ней следующим выражением:

$$P^{*1} = 2P^* - 1. \quad (2.18)$$

Двусторонняя достоверность также выбирается близкой к 1.

На практике для расчета доверительных границ обычно пользуются специальными таблицами, построенными для достоверности, равной 0.9; 0.95.

На рисунке представлена схема, которая показывает возможности принятия решений в процессе ТДК.



Принятие решений при диагностировании РЭС

На схеме:

H_{11} — гипотеза — истинное и измеренное значение параметра U_c в пределах допуска $U_n < U_c < U_B$; $U_n < U < U'_B$;

H_{10} — гипотеза — истинное значение параметра в пределах допуска $U_n < U_c < U_B$, измеренное — вне допуска $U > U'_B$ или $U'_n > U$;

H_{01} — гипотеза — истинное значение параметра вне пределов допуска $U_c > U_B$ или $U < U'_n$, а измеренное — в пределах допуска $U'_n < U < U'_B$;

H_{00} — гипотеза — истинное и измеренное значение параметра вне пределов допуска.

Гипотезы H_{11} и H_{00} представляют нам правильные, а гипотезы H_{01} и H_{10} — ошибочные решения. Правильные решения могут быть непосредственно использованы как критерий достоверности, ошибочные как меры недостоверности.

$$D = P(H_{11}) + P(H_{00}) = 1 - (P(H_{10}) + P(H_{01})). \quad (2.19)$$

Степень доверия к полученным результатам «ОД — работоспособен» может быть представлена выражением

$$D_{\text{раб}} = P(H_{11})/[P(H_{11}) + P(H_{01})], \quad (2.20)$$

а к результатам «объект неработоспособен» соответственно

$$D_{\text{нераб}} = P(H_{00})/[P(H_{00}) + P(H_{10})]. \quad (2.21)$$

Зная вероятность появления события τ H_{11} ; H_{00} ; H_{10} ; H_{01} , можно произвести соответствующие вычисления достоверности решений, принимаемых в процессе диагностирования.

Информационный подход к понятию «достоверность» хорошо раскрывает ее содержание.

Количество достоверности может быть представлено состоящим из произведения двух составляющих: методической достоверности D_m и достоверности инструментальной D_i .

Методическая достоверность — составляющая достоверности диагностики контроля, определяемая совокупностью контролируемых параметров, методикой контроля и принятыми критериями оценки технического состояния. Соответственно критериями оценки технического состояния. Тогда инструментальная достоверность определяется стохастическими свойствами контура контроля ДП, то есть параметрами СрДк:

$$D = D_m \cdot D_i. \quad (2.22)$$

Основная составляющая D_m — полнота контроля n_k — может быть рассмотрена по формуле

$$n_k = \sum_{i \in M_{\Pi}}^{nk} I_{ni} / (\sum_{i=1}^n I_{ni}) = \sum_{j=1}^{nk} H_{oj} / \sum_{i=1}^n H_{oi}, \quad (2.23)$$

где n — общее число ДП, определяющих техническое состояние РЭС; n_k — число контролируемых параметров; I_{ni} — информативность i -го параметра или проверки i -го параметра; M_{Π} — множество контролируемых параметров.

$$H_{oj} = I_{ni} = PP_i \log PP_i - (1 - PP_i) \log(1 - PP_i). \quad (2.24)$$

Инструментальная достоверность контроля $D_{и}$ может быть представлена через апостериорные вероятности работоспособного (неработоспособного) состояния. Подчеркнем следующее обстоятельство: ранее было показано, что информация в i -ой проверке относительно работоспособного состояния:

$$I_{иi} \rightarrow S_p = \log[P(S_p/U_i)]/[P(S_p)]. \quad (2.25)$$

Достоверность диагностирования можно рассчитать также на основе апостериорных вероятностей ошибок вида $(i,j) - P_{i,j}^A$ и полной вероятности правильного диагностирования.

Достоверность определения работоспособности состояния

$$D_p = P_{1.1}/(P_{1.1} + P_{2.1}) - P_{н.к}. \quad (2.26)$$

Для достоверности работоспособного и неработоспособного состояния принимают вид:

$$D_p = K_{п.п.} P_{1.1} / (P_{1.1} + P_{2.1}), \quad (2.27)$$

$$D_{п.р} = K_{п.п.} P_{2.2} / (P_{2.2} + P_{1.2}). \quad (2.28)$$

Одним из показателей того является вероятность допуска к применению неработоспособного устройства — вероятность ошибки 2-го рода.

Для этого случая достоверность принятия «допущен» к решению принимает вид

$$D_{2.1} = (1 - P_{н.к} - P_{2.1}) / (P_{1.2} + P_{1.1}). \quad (2.29)$$

Отметим, что в прикладных задачах ошибка (вид) такого вида не равнозначна ошибке предыдущего параметра требуемого вида, которая выявляется, как правило, в процессе повторного ТО или повторного контроля, то есть

$$D = \sum^m P_{1.2.d}, \quad (2.30)$$

где $P_{1.2.d}$ — вероятность ошибки диагностирования.

Расчет достоверности ТО по результатам диагностики и контроля позволяет полнее представить временные затраты при диагностике, восстановлении, контроле.

3. АЛГОРИТМЫ ПОИСКА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ДЕФЕКТОВ. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАДИОЭЛЕМЕНТОВ

3.1. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ УЗЛОВ РЭА КАК ОБЪЕКТОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Эффективная организация тестового покомпонентного диагностирования существенно зависит от способа математического описания электрических устройств (ЭУ) и средств диагностирования. Современный уровень развития радиоэлектроники и вычислительной техники характеризуется непрерывным возрастанием функциональной и конструктивной сложности РЭУ. Поэтому общее диагностирование ЭУ как неразрывного функционально-конструктивного объекта диагностирования (ОД) с целью идентификации любых видов дефектов является весьма трудоемкой задачей.

Указанное затруднение может быть преодолено, если ввести декомпозиционное представление ОД и рассмотреть соответствующую иерархию задач диагностирования. При этом уровнями анализа ОД могут быть уровни монтажа ЭРЭ, фрагментов схемы (многоэлементных компонентов), одноплатные и многоплатные ЭУ и т. д. Следствием декомпозиционного представления ОД является необходимость формального описания каждого уровня, описываемого своей математической моделью, являющейся частью общей модели [3].

Совокупность моделей, описывающих ОД на различных уровнях, должна удовлетворять следующим требованиям адекватности представляемой информации и ОД: полноте и непротиворечивости представления этих данных; возможности перехода от более сложных (общих) к более простым (частным) моделям. Основными требованиями при выборе математической модели для конкретного уровня представления ОД являются: обширное представление всех существенных параметров и абстрагирование от всех несущественных параметров на соответствующем уровне представления ОД; незатруднительное описание модели; легкая обработка данных на ЭВМ [3].

Исходя из рассмотренных требований к формальному описанию ОД целесообразно принять следующую иерархию моделей ЭУ: обобщенная модель ЭУ, в которой содержатся все данные, описывающие ЭРЭ и связи между ними; частные модели ЭУ различного уровня.

Обобщенной моделью диагностируемого ЭУ может служить его представление в виде сети

$$H = \{ \tilde{P}, \tilde{A}, L, X, Y, F \}, \quad (3.1)$$

где \tilde{P} — множество полюсов сети (внутренних и внешних контрольных точек ЭУ); \tilde{A} — множество компонентов (ЭРЭ или фрагментов схемы); L — матрица связи (L_1 — между полюсами, L_2 — между полюсами и компонентами); X — множество входных сигналов ЭУ; Y — множество выходных сигналов; F — множество рассматриваемых функциональных свойств ОД.

Каждый компонент сети обладает совокупностью свойств:

$$\{k_{ij}\}_{j=1,5}, \quad (3.2)$$

где k_{i1} — тип компонента; k_{i2} — порядковый номер; k_{i3} — выбранные диагностические параметры; k_{i4} — номинальные значения этих параметров; k_{i5} — величины полей допусков.

В сети H рассматривается множество неисправностей Q_H , состоящее из подмножества Q_L нарушений матрицы связей L , подмножества Q_k неисправностей компонентов и подмножества Q_f неисправностей взаимодействия между компонентами.

Сеть H называется компонентно-диагностируемой относительно множества Q_H неисправностей, если выполняются следующие условия:

1. Для каждого компонента может быть выполнен диагностический эксперимент с доступом ко входам и выходам этого компонента.

2. Диагностический эксперимент является не повреждающим для всех компонентов сети H .

3. На проверяемый компонент исключено влияние связанных с ним компонентов сети H .

Для достижения максимальной глубины поиска дефектов в ЭУ необходимо определить все минимальные компоненты сети путем соответствующей декомпозиции. Компонент Q_i называется минимальным, если он не может быть представлен в виде композиции двух или более компонентов.

Сеть H' называется поэлементно-диагностируемой, если все ее минимальные компоненты являются одноэлементными.

Путем различных преобразований можно получить списочную теоретико-множественную, графовую, сеть Петри и другие типы моделей ЭУ (рис. 3.1).

Под списочной моделью будем понимать массив линейно связанных списков $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$. Каждый список содержит описание отдельного элемента ОД и состоит из последовательности символов, характеризующих свойства рассматриваемого элемента. Списочная модель содержит всю информацию, необходимую для разработки рабочих программ поэлементного диагностирования и формирования многоэлементных компонентов, но она не отражает динамики процессов, происходящих в ЭУ.

Одной из частных моделей ЭУ может служить теоретико-множественная модель, в которой ЭУ ставится в соответствие системе семейств множеств $\Psi = \{M, L\}$, где M и L — семейства множеств элементов ЭУ и их дефектов.

Применение этой модели позволяет учитывать влияние на результат измерения совокупности элементов объекта и средств диагностики.

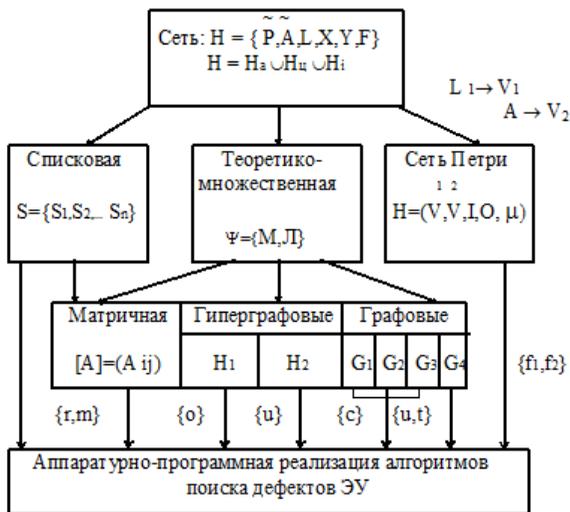


Рис. 3.1. Диагностические модели электронных устройств

3.2. ГРАФОВЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ПОИСКА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ДЕФЕКТОВ

Для выявления различных дефектов широкое применение нашли графовые модели. Основным недостатком распространенных моделей является неточное отражение некоторых видов кажущихся замыканий и обрывов, что уменьшает достоверность диагностирования. Для уточнения существующих моделей введем следующее определение.

Кажущимся коротким замыканием (КЗ) 1-го рода будем называть наличие в ЭУ электрической связи между парой узловых точек ОД с величиной взаимной проводимости $\gamma_4 > \gamma_{ij} \geq \gamma_2$, где γ_2, γ_4 — пороговые значения проводимостей, которые воспринимаются автоматической системой диагностирования (АСД) как КЗ при выполнении измерений соответственно по 2- или 4-проводной схеме.

Вследствие наличия в ОД КЗ1 (резисторов с малым сопротивлением, индуктивностей и конденсаторов большой емкости) возникает необходимость в предварительном формировании массива подозреваемых КЗ с последующим осуществлением для всех элементов этого массива высокоточных измерений.

Кажущимся КЗ 2-го рода будем называть наличие в ЭУ электрической связи между узловой точкой со всеми остальными узловыми точками с величиной суммарной взаимной проводимости $\gamma'_{ij} > \gamma_2$, где $\gamma'_{ij} = \sum \gamma_{ij}$, $\gamma_{ij} < \gamma_2$.

Транзитным КЗ между узловыми точками b_i , b_j будем называть соответствующую электрическую связь между этими двумя точками, обусловленную наличием действительных или кажущихся КЗ между парой узловых точек b_i , b_k , b_j , b_k , где $k \neq i \neq j$.

В качестве моделей диагностируемого ЭУ, предназначенного для автоматизации поиска дефектов различных видов, используются различные графовые модели.

Взвешенный мультиграф $G_i = (V_1, E_1)$, множество вершин которого V_1 , представляет множество узловых точек, а множество ребер E_1 — множество электрических связей между узловыми точками.

Взвешенный гиперграф $M_1 = [(X_1 A_1)(L_1 B_1)]$, множество вершин которого X_1 , представляет множество ЭРЭ ЭУ, а множество L_1 ребер — множество проводников, каждый из которых объединяет соответствующее подмножество ЭРЭ.

3.3. АЛГОРИТМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОБРЫВОВ, КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ И ДЕФЕКТОВ ОРИЕНТАЦИИ ЭРЭ

В общем случае обнаружение и разграничение обрывов можно осуществить путем сравнения матриц инцидентности $I(N_1)$ и $I(N_1)$ гиперграфовых моделей N_1 диагностируемого и N_1 эталонного ЭУ.

При обнаружении обрывов выполняется процедура разграничения действительных и кажущихся обрывов. При этом информация об отсутствии контакта между k -й иглой контролирующего устройства и контрольной точкой ЭУ заносится в список S^i . Блок-схема алгоритма контроля обрывов в ЭУ, обеспечивающего разграничения дефектов, приведена на рис. 3.2.

Обеспечить высокую производительность процесса поиска КЗ в ЭУ, содержащих до нескольких сот проводников, позволяют групповые методы контроля, например, логарифмический метод группового контроля, метод «одна точка со всеми» (ОТСВ), метод половинного деления, используемый для локализации КЗ. Однако групповые методы контроля могут быть реализованы только с использованием двухпроводных измерительных схем со значениями пороговой проводимости АСД γ_1 , поэтому обнаруженные с их помощью КЗ могут быть отнесены лишь к подмножеству подозреваемых замыканий, требующему дальнейшего разграничения на кажущиеся и действительные КЗ.

Максимальную производительность процесса поиска КЗ можно обеспечить при оптимальных сочетаниях описанных алгоритмов на основе декомпозиции ОД на три фрагмента: не содержащего только КЗ1; содержащего только КЗ2.

Процесс диагностирования осуществляется в два этапа:

- с использованием групповых методов контроля определяется множество подозреваемых КЗ и создается реберно-порожденный подграф;

- с помощью точных измерений действительных и кажущихся КЗ.

Разграничение осуществляется путем попарной проверки КТ ОД.

Формирование графов G_1 , G_2 , G_3 , G_{1n} , G_1^0 может осуществляться автоматически обработкой данных, получаемых при снятии характеристик эталонного ГУ, а также при обработке первого этапа контроля.

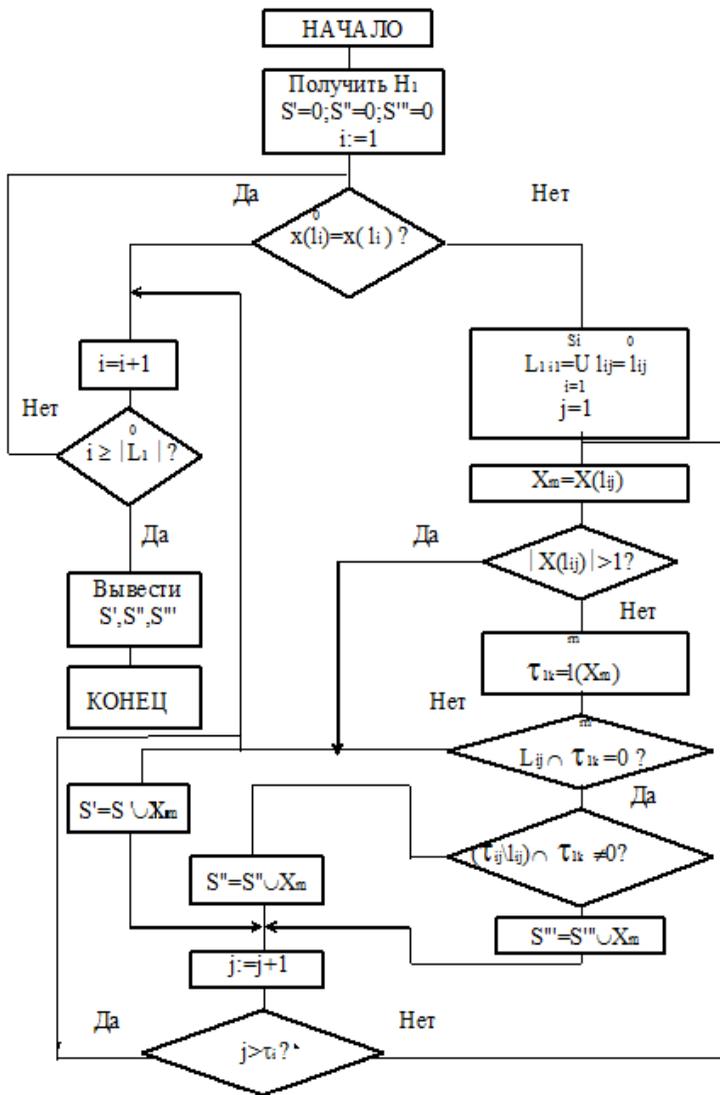


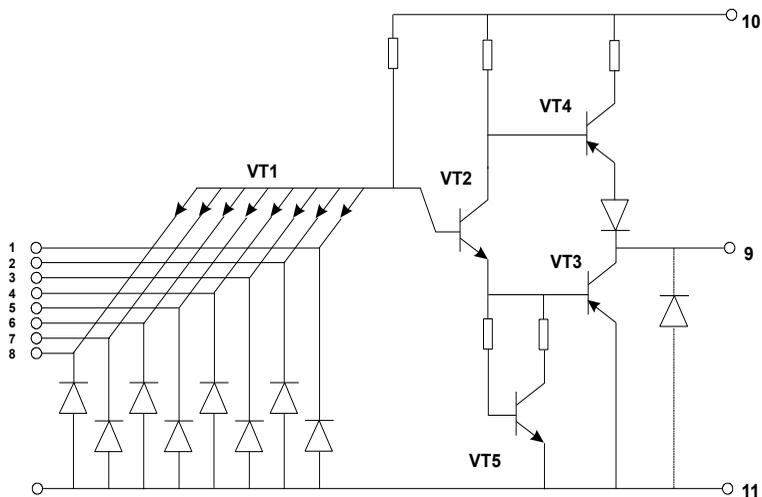
Рис. 3.2. Алгоритм идентификации обрыва

3.4. МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЕФЕКТОВ ОРИЕНТАЦИИ ЭРЭ

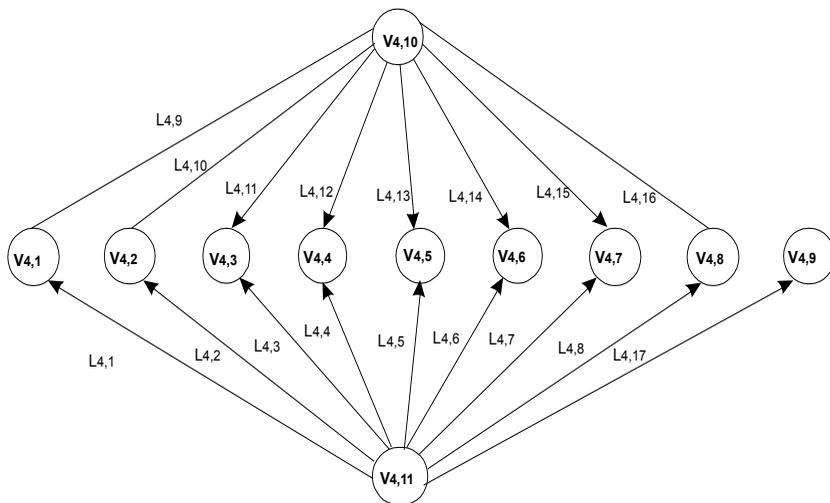
В общем случае многополюсные ЭРЭ, в том числе ЦИС и АИС, характеризуются множеством пассивных и активных параметров. С точки зрения организации процесса неповреждающего диагностирования, желательно производить проверку ориентации НС до подачи питающих напряжений, то есть по пассивным параметрам сложности особого рода возникают при проверке правильности ориентации и соответствия ЦИС заданному типу. Для этих целей можно использовать метод, основанный на проверке наличия защитных диодов на входах ЦИС и паразитных диодов, возникающих между выходами ЦИС и общей шиной ее питания.

Рассмотрим на примере электрической принципиальной схемы базового элемента 8И-НЕ, изображенного на рис. 3.3, *а*, ТТП логики и его графовой модели (рис. 3.3, *б*). При этом контролируются значения проводимости γ_{ij} между шиной питания +5В и контролируемым входом-выходом. При правильной ориентации проводимость $\gamma_{9,10}$ стремится к нулю, проводимость $\gamma_{1,10}$ также стремится к нулю. При неправильном же включении тестового напряжения $V_{\text{тест}} = 0.6\text{В}$ будет достаточно для того, чтобы открыть диоды, поэтому будет заметно повышение проводимости.

После определения правильности ориентации следует проверка соответствия типа ЦИС заданному, основанная на возможности разграничения входов и выходов контролируемой ЦИС. Такое разграничение осуществляется тестовым сигналом $U_c = 0.8 + 1\text{В}$, достаточным для отпираания эмиттерного перехода транзистора VT1. При этом проводимость $\gamma_{1,10}$ между входом и шиной питания +5В оказывается значительно выше значения проводимости $\gamma_{9,10}$ между ее выходом и шиной питания.



a)



б)

Рис. 3.3. Базовый элемент 8 И-НЕ (а) и его графовая модель (б)

3.5. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВИДОВ ДЕФЕКТОВ ЭЛЕКТРОРАДИОЭЛЕМЕНТОВ

Диагностирование транзисторов

При синтезе таких алгоритмов необходимо учитывать, что, в зависимости от конструктивного исполнения корпусов транзисторов, у них преобладают те или иные дефекты при монтаже.

Например, для транзисторов КТ 315, КТ 361 характерным дефектом является неправильная ориентация корпуса при установке на узел РЭА, то есть ориентация выводов базы и эмиттера, а также ошибочная установка транзистора другого типа проводимости. Для транзисторов с гибкими выводами возможно перепутывание при монтаже любых выводов. Дефекты легко устранимы, если ремонтный персонал получает полную и однозначную информацию о дефекте. К другим возможным дефектам следует отнести некачественную пайку выводов транзистора или обрыва его переходов.

В процессе диагностирования транзистора возможны следующие ситуации: $\{VT = P\}$ — установлен работоспособный транзистор; и БЭ — перепутаны выводы базы и эмиттера; и БК — перепутаны выводы базы и коллектора; и КЭ — перепутаны выводы коллектора и эмиттера; tVT — установлен транзистор другого типа проводимости; оЭБК — не припаен вывод базы; оЭБ — не припаен вывод эмиттера или обрыв перехода база — эмиттер; оКБ — не припаен вывод коллектора или обрыв перехода база-коллектор.

Элементарные проверки при диагностировании транзистора: П1 — тест проверки работоспособности транзистора; П2 — проверка падения напряжения на переходе база-эмиттер при напряжении смещения, приложенном в прямом направлении; П3 — проверка падения напряжения на переходе база-эмиттер при напряжении смещения, приложенном в обратном направлении; П4 — проверка падения напряжения на переходе база-коллектор при напряжении смещения, приложенном в обратном направлении; П5 — проверка падения напряжения

на переходе база-эмиттер транзистора, приложенного в прямом направлении.

На рис. 3.4 представлен алгоритм диагностирования транзисторов.

Проверкой П1 при включении транзистора в специальную схему определяем исправное состояние транзистора или факт его неработоспособности. Последующие проверки осуществляются для уточнения вида дефекта.

Приведенное в качестве примера множество неисправных состояний транзистора не покрывает всех его технических состояний. Возможна, например, редкая ситуация, когда вместо транзистора n-p-n типа установлен транзистор структуры p-n-p, у которого к тому же перепутаны выводы базы и эмиттера.

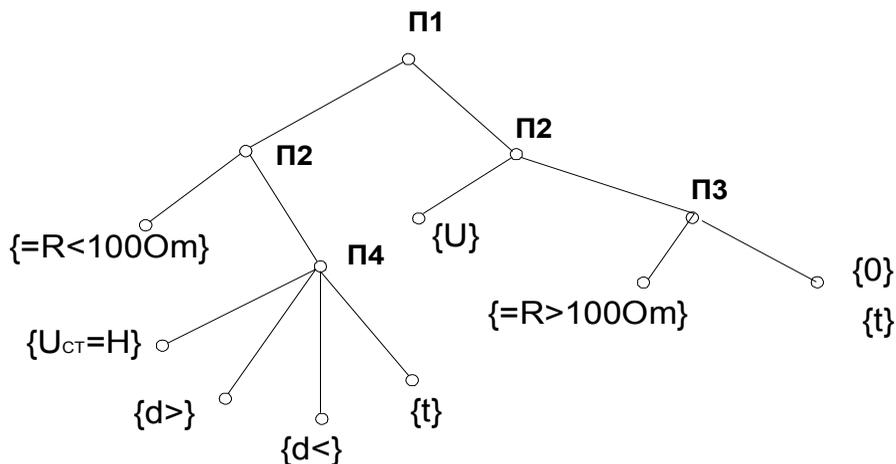


Рис. 3.4. Алгоритм диагностирования транзисторов

Для идентификации подобного дефекта вида $t \vee T \cap$ и БЭ можно ввести дополнительную проверку П6, обеспечивающую измерения проводимости между выводами коллектора и эмиттера. Наличие или отсутствие соответствующего значения проводимости коллектора и эмиттера является диагностическим признаком, позволяющим различить указанный дефект двойной кратности от дефекта вида ОКБ.

Алгоритм поэлементного диагностирования стабилитронов

К наиболее распространенным дефектам, возникающим при монтаже стабилитронов в узлах РЭА, следует отнести следующие: неправильная полярность включения (u), установка стабилитронов с другим напряжением стабилизации (t). Причина возникновения дефектов объясняется тем, что по конструктивному исполнению многие типы стабилитронов не различимы по внешнему виду, например, Д814, КС156 и др., либо имеют довольно большое сходство. Вероятность ошибки особенно велика, если в электронное устройство монтируют несколько стабилитронов с различным напряжением стабилизации.

Среди прочих дефектов можно выделить такие, как некачественная пайка выводов, установка вместо стабилитронов полупроводниковых диодов или резисторов, технологические дефекты изготовления. Для обеспечения ремонта информация о дефекте должна носить конкретный характер. Проверка основного параметра стабилитрона — напряжение стабилизации — связана с подачей на стабилитрон, а следовательно, и в объект диагностирования значительных напряжений. Поэтому при диагностировании стабилитрона необходимо прежде всего осуществить проверку его ориентации.

У стабилитрона возможны следующие технические состояния:

$\{U_{ст} = N\}$ — $U_{ст}$ соответствует номинальному значению; $\{u\}$ — неправильная полярность включения стабилитрона; $\{o\}$ — обрыв перехода стабилитрона либо некачественная пайка одного из выводов; $\{= R < 100 \text{ Ом}\}$ — вместо стабилитрона установлен резистор сопротивлением менее 100 Ом; $\{= R > 100 \text{ Ом}\}$ — вместо стабилитрона установлен резистор сопротивлением более 100 Ом; $\{t\}$ — установлен стабилитрон другого типа или вместо стабилитрона установлен диод; $\{d>\}$ — $U_{ст}$ выше нормы; $\{d<\}$ — $U_{ст}$ ниже нормы. Состояния $\{d>\}$, $\{d<\}$ возникают, как правило, если в электронном устройстве монтируются несколько стабилитронов, $U_{ст}$ которых близки по значениям.

В процессе диагностирования стабилитрона подаются следующие элементарные проверки: П1 — проверка падения напряжения на р-п переходе при напряжении смещения, приложенном в прямом направлении; П2 — проверка падения напряжения на р-п переходе при напряжении смещения, приложенном в обратном направлении; П3 — тестовые воздействия на постоянном токе с амплитудой напряжения $U = 0.1\text{В}$ и включением максимального диапазона измерения резистора; П4 — измерение номинального значения $U_{\text{ст}}$.

Алгоритм диагностирования стабилитронов приводится на рис. 3.5.

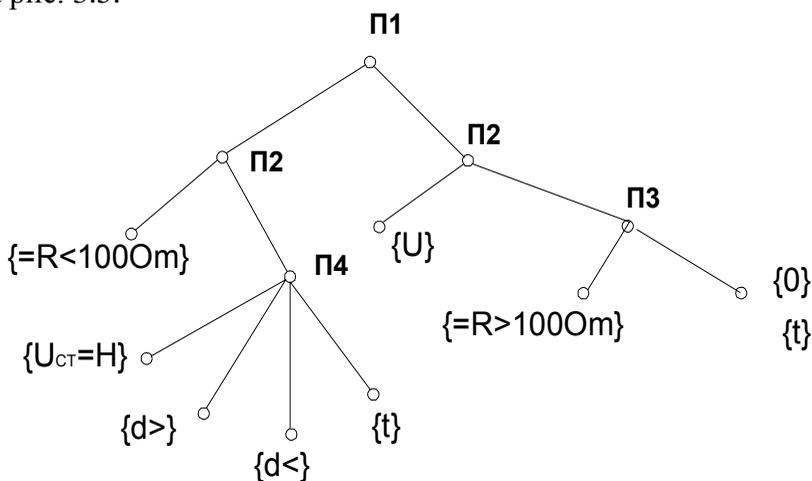


Рис. 3.5. Алгоритм диагностирования стабилитронов

Для увеличения глубины поиска дефектов наиболее целесообразной является следующая очередность тестирования компонентов ЭУ:

1. Установить ОД на контактное устройство.
2. Выполнить необходимые регулировки в ЭУ (установить потенциометры, переключатели).
3. Проверить отсутствие обрывов и коротких замыканий в ОД. При наличии дефектов топологии устранить их.
4. Осуществить диагностирование дискретных ЭРЭ.

5. Проверить правильность ориентации цифровых и аналоговых ИС относительно цепей питания.
6. Проконтролировать операционные усилители, реле, теристоры, стабилитроны.
7. Проверить функциональные узлы и ЭУ в целом.

Особенности идентификации дефектов в ЭУ с шинной организацией цифровых структур

В основе построения различных ЭУ, содержащих микропроцессорные БИС, лежит магистральный принцип обмена информацией между отдельными компонентами. В таких условиях сложной проблемой является поиск дефектов среди компонентов, подключенных к общей шине. Так, при наличии дефектного компонента, подключенного к шине связи, однозначно фиксируется потенциал шины, который не изменяется при подаче теста на любой из подключенных к ней компонентов.

Достоверная локализация места дефекта проводится с помощью специально разработанных программ направленного поиска с применением токовых пробников или измерительных зондов, обеспечивающих ручное бесконтактное измерение тока в логических цепях с помощью магниточувствительных преобразователей. В таких случаях в процессе контроля на соответствующие компоненты поступает импульсный сигнал, который приводит к формированию пульсирующего тока определенного уровня, фиксируется компаратором, подключенным к выходу магнитного измерительного преобразователя.

Однако в большинстве случаев применения поисковых зондов не дают желаемых результатов, так как указание точного места дефекта существенно зависит от навыков оператора и многократности повторных измерений, что отрицательно сказывается в условиях массового производства. Рассмотренные трудности поиска дефектов в шинных структу-

рах во многих случаях удастся устранить в системах покомпонентного диагностирования. Наличие доступа к выводам всех компонентов цифрового ЭУ в системе покомпонентного диагностирования позволяет упростить и автоматизировать процесс поиска дефектов контактного типа в шинных структурах. Наиболее важен при этом выбор диагностических параметров, на основании которых происходит идентификация дефектного компонента.

Дефектный компонент при подаче на его входы тестового воздействия не изменит значение своего выходного сигнала. Анализ показал, что в качестве диагностических параметров целесообразно выбрать значение измеряемого напряжения в общей точке, а также значение относительного изменения тока в шине при поочередном переключении режимов каждого из компонентов, подключенных к ней. При этом, в зависимости от схемотехнической реализации самой шины, применяется тот или иной диагностический критерий поиска дефектного компонента, а также алгоритм их идентификации.

Предлагаемый способ диагностирования шинных структур заключается в том, что на проверяемое устройство подают напряжение питания, затем все компоненты, подключенные к шине связи, переводят, например, в состояние высокого импеданса путем подачи соответствующих сигналов логического нуля во внутренние точки устройства. После этого измеряют уровень напряжения на шине и тем самым определяют наличие дефекта среди подключенных к ней компонентов. Затем, поочередно изменяя режим работы каждого компонента, измеряют выходной ток в шине и сравнивают с эталонным значением. Затем делается заключение об исправности компонента.

3.6. МЕТОД ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗДЕЛЕНИЯ СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ НА ДВУХПОЛЮСНЫЕ ЦЕПИ

При поэлементном диагностировании аналоговых и гибридных ЭУ основной задачей является измерение параметров комплексных двухполюсных электрических цепей (ДЭЦ).

Параметры пассивных электрических цепей нельзя определить непосредственно. О них можно судить лишь на основании распределения напряжений и токов на элементах некоторой электрической схемы, в которую входит исследуемая ДЭЦ. Кроме того, ДЭЦ, параметры которой необходимо оценить, входит в состав цепи более сложной структуры и в большинстве случаев образует замкнутые контуры с другими ее элементами. Следовательно, для оценки параметров ДЭЦ в составе СЭЦ необходимо осуществить процесс преобразования этих параметров в активные сигналы инвариантно, то есть независимо от остальных элементов СЭЦ [2].

В общем случае СЭЦ характеризуется некоторым множеством импульсов $P = \{P_j\} j = 1, 2, \dots, n$ и множеством ветвей $Z = \{Z_i\} i = 1, 2, \dots, m$.

Двухполюсными $Z_i \in Z$ связывают доступные полюса $P_i \in P$ $P_e \in P$, $1 \leq e \leq n$, $1 \leq k \leq m$ можно измерить, если каждый путь в СЭЦ от полюса P_i к полюсу P_e , не считая пути через измеряемый двухполюсник, содержит по меньшей мере один доступный полюс. Следовательно, чтобы измерить параметры двухполюсников (ДП) всего множества Z необходимо, чтобы были доступны полюса всего множества P .

При выполнении этих условий для измерений параметров ДП $Z_i \in Z$ определяют подмножество $Z' \in Z$, имеющие общий полюс с одним полюсом, например P_e , измеряемого двухполюсника Z_i и определяют подмножество Z' . Объединяя все элементы подмножества Z' , СЭЦ преобразуют в цепь типа «треугольник» (рис. 3.6).

В этой цепи одна ветвь является ДП $Z_x \in Z$, а все остальные элементы СЭЦ представляют собой две шунтирующие ветви Z_1 и Z_2 . Для электрического разделения измеряемого ДП

Z_x от шунтирующих ветвей Z_1 и Z_2 полученную цепь включают в некоторую схему, создающую электрический режим, при котором разность потенциалов на полюсах измеряемого ДП или ток в нем зависит только от его параметров и является информативным сигналом о них. Если в узлах 2 и 3 электрической цепи создать равенство потенциалов, то через шунтирующую ветвь Z_1 будет протекать нулевой ток, что обеспечит в ней режим электрического разрыва. Тогда измеряемая ветвь Z_x может рассматриваться как изолированный ДП.

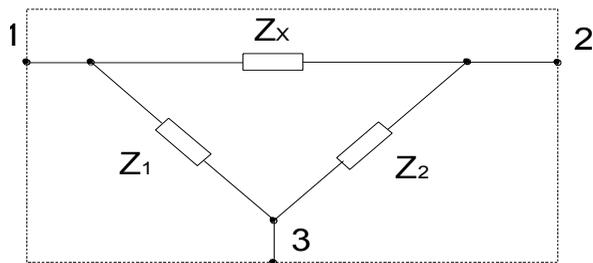


Рис. 3.6. Цепь типа «треугольник»

Устройство, обеспечивающее такой режим, называют первичным преобразователем (ПП). ПП представляют собой замкнутые структуры с уравниванием и могут быть разделены на два класса, отличающиеся тем, как на входе или в цепи ОС включена СЭЦ типа «треугольник», содержащая преобразованную ДЭЦ (рис. 3.7).

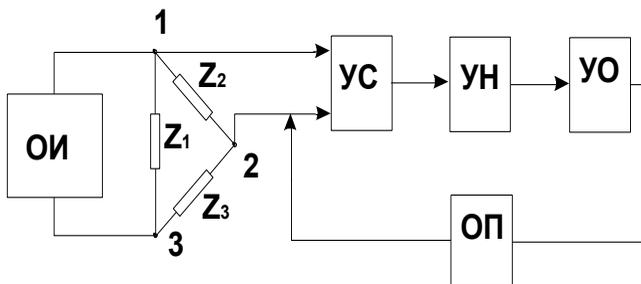


Рис. 3.7. Схема первичного преобразователя

Схема содержит опорный источник ОИ, устройство сравнения УС, усилитель некомпенсации УН, устройство отработки УО, обратный преобразователь ОП и СЭЦ.

В данной схеме реализуются режимы разделения двумя способами:

1. В качестве ОИ используется источник напряжения, а для оценки активной величины применяется преобразователь тока с нулевым входным сопротивлением, создающий режим нулевого напряжения на полюсах 1-2. Преобразующей ветвью является Z_3 , компенсированный ток, формируемый ОП по результату сравнения.

2. ОИ используется источник тока, а коэффициент преобразования ОП ≤ 1 . При этом преобразованной ветвью является Z_1 , на которой падает напряжение, компенсируемое между 1 и 2. Первый способ реализует метод заданного напряжения на преобразованной ветви, а второй — заданного тока.

Схема ПП с СЭЦ в цепи ОС показана на рис. 3.8.

Схема реализует режим разделения двумя способами. Если в качестве ОИ использовать источник напряжения, создается режим заданного тока через преобразованную ветвь Z_3 , а при использовании в качестве ОИ источника тока — режим заданного напряжения на преобразованной ветви Z_1 (в этом случае второй вход УС отключается от узла 1 СЭЦ и подключается к выходу УО).

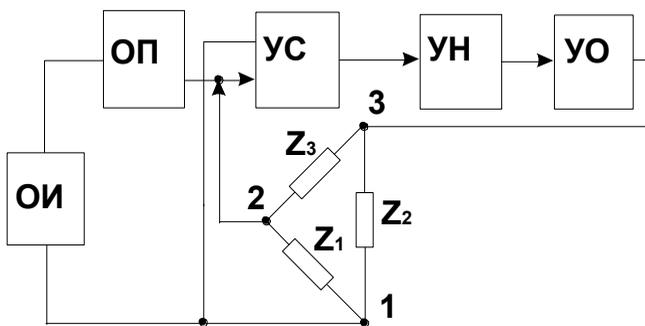


Рис. 3.8. Схема ПП с СЭЦ в цепи ОС

Уравновешивание для обоих классов ПП может осуществляться как путем слежения за изменением второй сравниваемой активной величины, так и путем изменения уравновешивающей величины по определенной программе.

В соответствии с этим в ПП может быть организован следящий и развертывающий режим работы. В последнем случае информативный выходной величины активной составляющей значение или же параметр координаты развертывания (например, интервал времени). На основе обобщения структурных схем ПП можно построить множество различных функциональных схем. Наибольшее распространение получили ПП следящего уравновешивания, построенные на основе активных элементов — усилителей напряжения и повторителей напряжения, в качестве которых используются операционные усилители, выполняющие все функции прямой цепи уравновешивающего канала.

С точки зрения таких критериев как универсальность, погрешность преобразования, время преобразования, а также функции зависимости выходного сигнала от преобразуемого параметра, отсутствуют принципиальные различия в выборе активных элементов, поэтому рассмотрим преобразователи, построенные на усилителях напряжения (рис. 3.9).

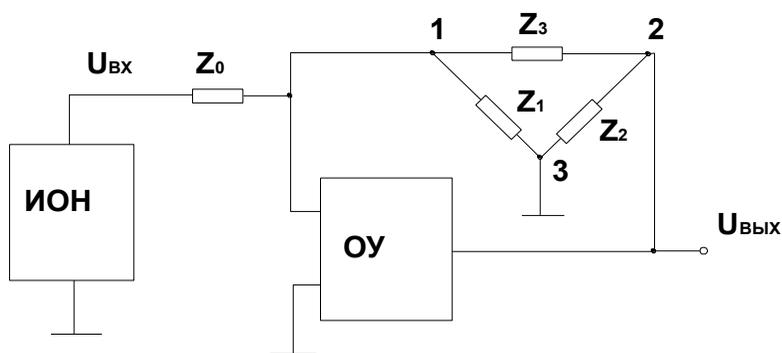


Рис. 3.9. Схема ПП следящего уравновешивания

Входной дифференциальный каскад ОУ для обеих схем выполняет функцию сравнения, при этом разностный сигнал усиливается и через цепь отрицательной ОС подается на вход усилителя. Благодаря этому на полюсе 1 СЭЦ при достаточно высоком коэффициенте усиления ОУ с высокой точностью устанавливается нулевой потенциал. В ветви Z_1 организуется режим электрического разрыва из-за малого $R_{вх}$ ИОН (рис. 3.10). Для схемы (рис. 3.9) выходное напряжение будет пропорционально сопротивлению Z_x преобразуемой ДЭЦ и равно $U_{вых} = -U_{вх} Z_x/Z_0$. Схему (рис. 3.9) обозначают — «схемой Z», а схему (рис. 3.10) — «схемой Y».

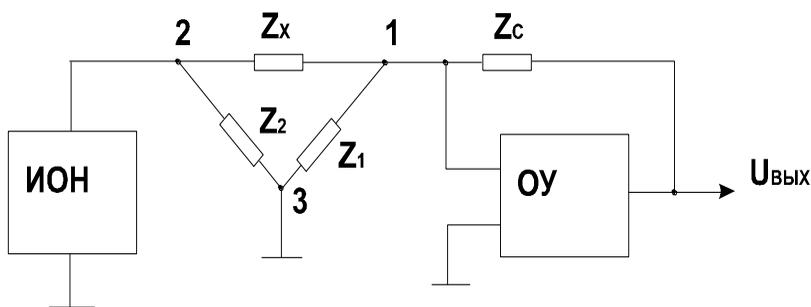


Рис. 3.10. Схема ППП с малым входным сопротивлением ИОН

3.7. МЕТОДЫ РАЗДЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ ДВУХПОЛЮСНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

В общем случае выходной сигнал любого ППП параметра ДЭЦ можно рассматривать как

$$U(t) = \sum_{i=1}^n U_i(t). \quad (3.3)$$

Значение каждой из них несет информацию об одном параметре исследуемой ДЭЦ. Специфика поэлементного диагностирования определяет прежде всего необходимость получения информации отдельно о каждом параметре, характеризующую ДЭЦ как комплексное сопротивление. Процесс выделения из общего сигнала $U(t)$ состава $U_i(t)$, информативного тому параметру исследуемой ДЭЦ и преобразование ее в унифицированный сигнал Y , называется инвариантным измерительным преобразованием, а устройства, реализующие этот процесс, — измерительными преобразователями (ИП).

Наиболее существенной классификацией ИП является классификация по виду структурной схемы, определенному методу преобразования и предоставление возможности широких обобщений независимо от конкретных особенностей отдельных узлов ИП. По виду структурной схемы различают ИП с разомкнутой и замкнутой структурными схемами. В ИП, основанных на методе сопоставления или прямого преобразования с разомкнутой структурной схемой, передача информации с выхода на вход отсутствует. Все преобразования имеют одно направление – от входа к выходу. Они являются простейшими и представляют собой цепь последовательно соединенных звеньев. Простота, надежность и высокая скорость измерения таких ИП определяют целесообразность их применения для решения круга задач. Известны различные модификации ИП прямого преобразования путем выделения синфазной и квадратурной составляющей напряжения на выходе первичных преобразователей.

Общие положения являются основой синтеза ИП, работающих по методу прямого преобразования. Представим условно ИП работающих по «схеме Y » (рис. 3.11) в виде цепи, состоящей из последовательно соединенных преобразуемых каскадов сопротивления Z_x емкостного характера, представленного параллельной схемой замещения с составляющими R_x и C_x и образцового резистора R_0 (рис. 3.12).

Влияние шунтирующих элементов будем считать исключенным полностью методом электрического разделения. Синусоидальное напряжение U_{zx} , UR_0 и U , действующее в цепи I_{R_x} , I_{C_x} , I_{R_0} — токи, протекающие соответственно через активные R_x и реактивные C_x составляющие преобразуемого сопротивления и образцовое активное сопротивление R_0 . Непосредственное преобразование составляющей тока, протекающей через образцовое сопротивление R_0 (\approx составляющей преобразуемого U), невозможно, так как точка 1 на векторной диаграмме условна и получена в результате замещения реальных выходных сигналов ПП его вещественной или мнимой составляющей.

Сущность преобразования заключается в том, что путем операции над векторами V искусственно восстанавливается, то есть (не обязательно в той же точке) такими операциями являются операции поворота, инверсии и проектирования векторов напряжений в цепи. Для получения $U_B = I_{C_x}R_0 \approx C_x$ преобразуемому сопротивлению необходимо повернуть на $-\pi/2$ напряжение U_{zx} и спроектировать на него напряжение $U_{C_x}Z$. При этом исходное напряжение определяется как

$$jV_{Zx} \omega C_x R_0 = I_{C_x} R_0 = U \cos (U - jU_z), \quad (3.4)$$

где jU_{zx} — напряжение U_{zx} , повернутое на $-\pi/2$; ω — частота тестового воздействия преобразователя; $(U_1 - jU_{zx})$ — угол между векторами напряжений $U_n - jU_{zx}$.

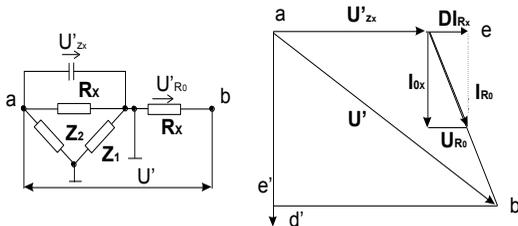


Рис. 3.11. Схема ИП, работающего по методу прямого преобразования

Такую функцию реализуют с помощью фазочувствительных преобразователей. Для исключения влияния на результат преобразования нестабильных источников тестового воздействия осуществляют операцию деления, и

$$\omega C_x R_0 = U \cos (U_1 - jU_{zx}) / (-jU_{zx}). \quad (3.5)$$

Для рассматриваемой цепочки можно привести следующие функции:

$$\omega C_x R_0 = jU \cos (jU, U_{zx}) / U_{zx} \quad (3.6)$$

$$R_0 / R_x = U_{R0} \cos (U_{R0}, U_{zx}) / U_{zx} \quad (3.7)$$

$$\omega C_x R_x = -jU_{R0} \cos (-jU_{R0}, U_{zx}) / U_{zx} \quad (3.8)$$

$$R_0 / R_x = (U_{R0} / jU_{zx}) \cos (U_{R0}, -jU_{zx}). \quad (3.9)$$

Полученные функции определяют операции, которые необходимо производить, и поэтому могут служить алгоритмом для синтеза структуры ИП прямого преобразования. Основными элементами ИП, выполняющими функции 1-4, будут Ф-фазовращатели; фазочувствительные преобразователи ФП1, ФП2, ФП3; измерители соотношений ИС1, ИС2 и ПП по «схеме Y», в состав которой входит СЭЦ, содержащая преобразуемую составляющую C_x и R_x комплексную ДЭЦ. Используются в схеме (рис. 3.12) три преобразующих фазовращателя, которые обусловлены стремлением получения максимально возможного единообразия элементов ИП. ФП3 играет роль амплитудного детектора, так как на оба входа подается одинаковый сигнал. При использовании образцового резистора R_0 в качестве элемента сравнения, результата преобразования, емкостная составляющая комплексной ДЭЦ зависит от частоты тестового воздействия. Этого можно избежать, используя вместо R_0 конденсатор C_0 .

Наряду с методом прямого преобразования существуют и другие методы: двухтактного замещения интегрирования, автоматической коррекции погрешностей преобразования (на основе методов замещения).

Сущность метода двухтактного замещения интегрирования заключается в том, что выходной сигнал ПП, который несет информацию о синфазной и квадратурной составляющей комплексной ДЭЦ, интегрируют в течение времени, равного полупериоду синусоидального напряжения источника тестового воздействия. Погрешность δ преобразования уменьшается с помощью компенсации внешних воздействий, стабилизации отдельных возмущающих факторов (термостабилизация), защиты и изолирования от действия внешних источников (экранирование, тепловая изоляция).

В измерительно-преобразовательных системах с замкнутой структурой выходной сигнал сравнивается с входным вычитанием. В результате образуется компенсация, которая используется для регулировки активных или пассивных величин с целью достижения заранее известного соотношения между активной величиной, характеризующей состояние ИП уравниванием. При этом между регулируемыми и преобразованными параметрами имеет место определенная зависимость. ИП с регулируемыми пассивными элементами лишены быстрогодействия, а бесконтактные ключи недостаточно совершенны. Поэтому наиболее распространенными являются преобразователи, в которых уравнивание производится регулированием активной величины и реализуется электронными средствами. Схемы таких ИП называются компенсационно-мостовыми (рис. 3.13).

В общем случае ИП включает в себя ПП, являющуюся двухконтурной. Выходная величина ИП преобразуется СП2 в величину X_k , однородную с активной X , в которую преобразуются параметры исследуемой комплексной ДЭЦ. Величины X_k и X сравниваются в УС вычитанием. Образующаяся разность $\Delta X = X - X_k$ усиливается УН.

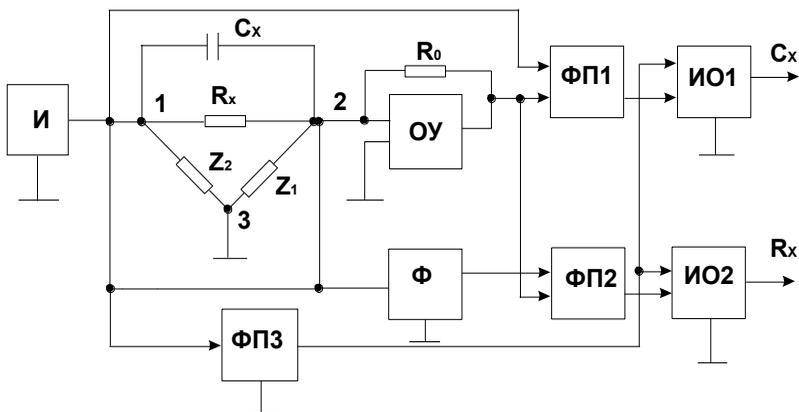


Рис. 3.12. Схема ИП прямого преобразования

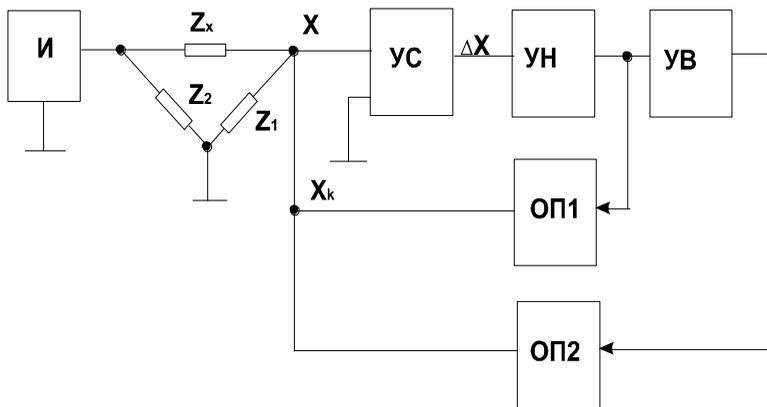


Рис. 3.13. Схема компенсационно-мостового ИП

Затем в соответствующем устройстве УВ производится выделение сигнала, пропорционального искомому параметру исследуемой ДЭЦ, и преобразование в его унифицированный сигнал. Выходная величина ИП будет изменяться до тех пор, пока пропорциональный компенсирующий сигнал не сравняется по величине: $X = X_k$.

Различают ИП следящего и развертывающего уравнивания.

В ИП следящего уравнивания результат сравнения используется для достижения с заданной точностью равенства сравниваемых величин (рис. 3.14).

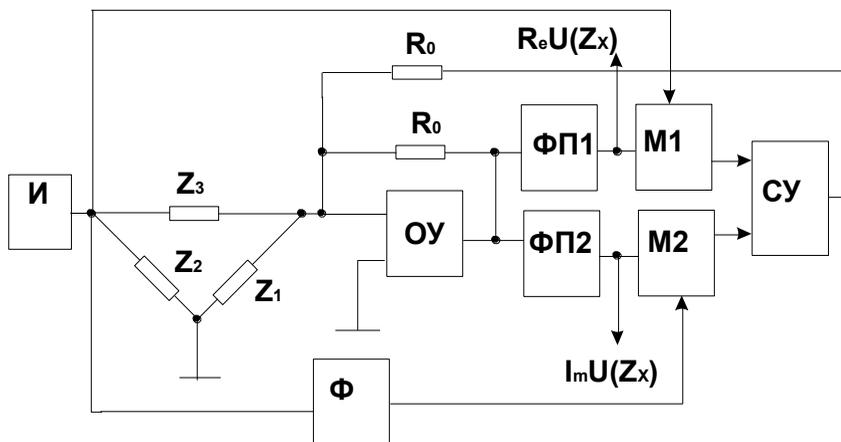


Рис. 3.14. Схема двухканального статического измерителя

Двухканальный статический измеритель состоит из: источника тестового воздействия И; фазовращателя Ф; фазочувствительных преобразователей ФП1 и ФП2; модуляторов М1 и М2; суммирующего усилителя СУ; усилителя сравнения, выполненного на ОУ: с элементом R, в цепи отрицательной ОС, образцового R_0 и СЭЦ содержащий преобразованную ДЭЦ Z_x и интегрирующие элементы Z_1 и Z_2 . Схема обеспечивает раздельное преобразование синфазной $R_e U(Z_x)$ и квадратурной $I_m U(Z_x)$ составляющих напряжений ОУ в напряжение постоянного тока с уровнем пропорциональной синфазной и квадратурной составляющим. Наличие двух ФП позволяет осуществить развязку каналов уравнивания.

Полученные сигналы управляют работой модуляторов М1 и М2, которые соответственно с СУ и R_0 выполняют роль обратного преобразователя ОП2. R_1 в роли обратного преобразователя

зователя ОП1. Процесс, уравниваемый по такой схеме, может сочетаться как с гармоническим, так и с импульсно-периодическим тестовым воздействием. В режиме равновесия в схеме создается равенство токов, протекающих через R_0 и преобразуемую ДЭЦ, а через R_0 ток не протекает.

ИП разvertyвающего уравнивания или динамической компенсации бывают по 1 или 2 параметра (малое быстроедействие). Процесс компенсации основан на том, что активный сигнал (напряжение или ток), несущий информацию о преобразующем параметре исследуемой ДЭЦ, компенсируется напряжением или током, изменяющимся пропорционально некоторому параметру (времени). Скорость изменения компенсирующего сигнала при этом меняется до тех пор, пока момент компенсации не будет удовлетворять некоторым наперед заданным условиям (равенство времени от начала нарастания компенсации до момента компенсации четверти периода). Эти функции выполняет схема, приведенная на рис. 3.15.

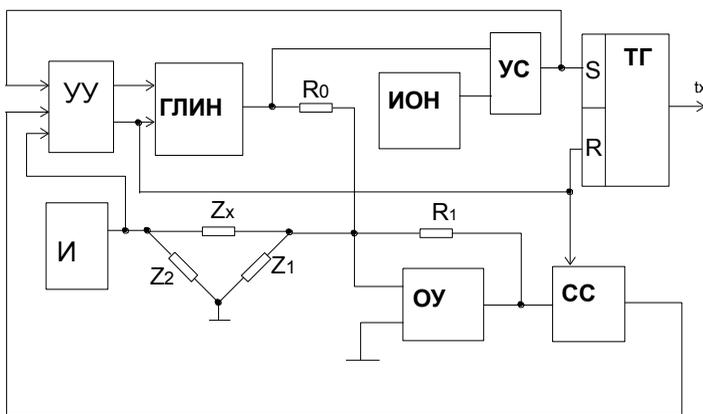


Рис. 3.15. Схема ИП разvertyвающего равновесия

Она состоит из: источника тестового воздействия И; устройства управления УУ; генератора линейно изменяющегося напряжения ГЛИН; ИОН устройства сравнения УС;

схемы совпадения СС; триггера Тг; ОУ с резисторами R_1 в цепи с отрицательной ОС; образцового резистора R_0 и СЭЦ, содержащей преобразуемую ДЭЦ и интегрирующие элементы Z_1 ; Z_2 . При преобразовании емкости ДЭЦ C_x , ГЛИН формируют линейно-нарастающее напряжение, которое посредством R_0 преобразуется в ток. Начало развертки соответствует моменту времени, когда значение импульса напряжения U максимальное. Сравнение токов осуществляется ОУ. Если время от начала развертки до момента компенсации больше или меньше времени четверти периода, то на последующий период изменяется наслон компенсации тока. При выполнении условия равенства времени компенсации $1/4 T$ срабатывает схема совпадений, а время регистра Тг будет пропорционально преобразуемой емкости ДЭЦ.

При преобразовании активной составляющей ДЭЦ R_x ГЛИН формирует линейно-убывающее напряжение, а напряжение развертки соответствует времени перехода через 0 напряжения тестового воздействия.

3.8. АВТОМАТИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Под измерительным преобразователем (ИП) с автоматической коррекцией погрешностей обычно понимают ИП, имеющие дополнительные звенья, блоки или вычислительные операции, которые уменьшают погрешности преобразования ИП.

Различают ИП с аддитивной и мультипликативной коррекциями погрешности вычитания величин, которые пропорциональны входной и выходной величинам корректируемого ИП, то есть создается величина, пропорциональная погрешности ИП. Эта величина при аддитивной коррекции погрешности суммируется с полученным результатом преобразования, а при мультипликативной используется после усиления для изменения коэффициента передачи одного из звеньев прямой цепи ИП.

При коррекции широкополосных ИП — эффективность аддитивной коррекции, так как она производится по мгновенным значениям, резко снижается из-за неизбежных фазовых сдвигов в области верхних и нижних частот. Мультипликативная коррекция производится по интегральным значениям, и этот недостаток в ней отсутствует. Однако такие ИП сложны, поскольку они содержат в прямой цепи звено с регулируемым коэффициентом преобразования, которое входит в замкнутый контур, из-за чего могут возникнуть автоколебания.

Среди структурных методов уменьшения погрешности преобразования в настоящее время наибольший интерес представляет итерационная коррекция, основанная на теории итерационных методов. В измерительной технике итерационные методы позволяют воспроизвести заданную функцию в окрестностях преобразуемой величины, не выделяя составляющих погрешностей. При этом достигается высокая точность преобразования при сравнительно низкой точности корректируемого ИП.

В основе итерационной коррекции погрешности лежит метод замещения активной величины $\varphi_1(Z_x)$, в которую преобразованы пассивные параметры исследуемой ДЭЦ (двухполюсной электрической цепи), некоторой известной активной величиной, получаемой из выходного сигнала ИП Y с помощью точного ОП (обратного преобразователя) с характеристикой $\varphi_2(Y)$. При итерационной коррекции также производится сравнение величин вычитанием, однако не на входе, а на выходе корректируемого ИП, то есть уже преобразованных в ИП величин. Задача итерационной коррекции состоит в сведении к нулю результата сравнения

$$F[\varphi_1(Z_x)] - F[\varphi_2(Y_x)] = 0, \quad (3.10)$$

где (Y_x) — искомое значение преобразуемой величины Z_x .

Это можно достигнуть с помощью итерации, используя следующий алгоритм, который называют обобщенным алгоритмом итерационной коррекции погрешностей:

$$Y_{n+1} = Y_n - a(n)\{F[\varphi_2(Y_n)] - F[\varphi_1(Z_x)]\}, \quad (3.11)$$

где $n = 0, 1, 2, \dots$ — номер итерации; Y_n — результат преобразования после n -ой итерации; $a(n)$ — шаг алгоритма; F — функция преобразования корректируемого ИП.

Структурная схема ИП, работающего по этому алгоритму, приведена на рис. 3.16. В его состав входит: источник тестового воздействия И; переключатели $SW_1 - SW_4$; СЭЦ (сложные эл. цепи), содержащая преобразуемую ДЭЦ Z_x и шунтирующие элементы Z_1 и Z_2 ; ОУ с резистором R_1 , в цепи отрицательной обратной связи, устройства выделения составляющих, пропорциональных преобразуемой ДЭЦ Z_x , и преобразования их в унифицированный сигнал Y , УВ два блока памяти БП1, БП2, два устройства сравнения УС1, УС2 блок задания шага итерационной коррекции $a(n)$, преобразователь выходной величины Y_n в величину, однородную с выходной величиной источника тестового воздействия ПВ и образцовый резистор R_0 .

Совокупность блока ПВ и образцового резистора R_0 представляет собой обратный преобразователь с функцией $\varphi_2(Y_n)$. Преобразование и коррекция погрешности на каждой итерации выполняется в два этапа. На первом этапе производится преобразование $F[\varphi_1(Z_x)]$, которое запоминается в БП1. При этом переключатели SW_2 и SW_3 должны быть замкнуты. На втором этапе производится коррекция результатов преобразования. Положение переключателей $SW_1 - SW_4$ изменяется на противоположное, в результате чего на входе корректируемого ИП подается выходная величина обратного преобразователя $\varphi_2(Y_n)$ и выполняется преобразование $F[\varphi_2(Y_n)]$. По полученным значениям $F[\varphi_2(Y_n)]$, $F[\varphi_1(Z_x)]$ и по значению скорректированного результата преобразования n -ой итерации Y_n , хранимому в блоке БП2 с помощью алгоритма (3.11), получают новый скорректированный результат преобразования Y_{n+1} , на чем и заканчивается одна итерация. С увеличением n значения Y_n будут всё ближе и ближе приближаться к искомому значению Y^* .

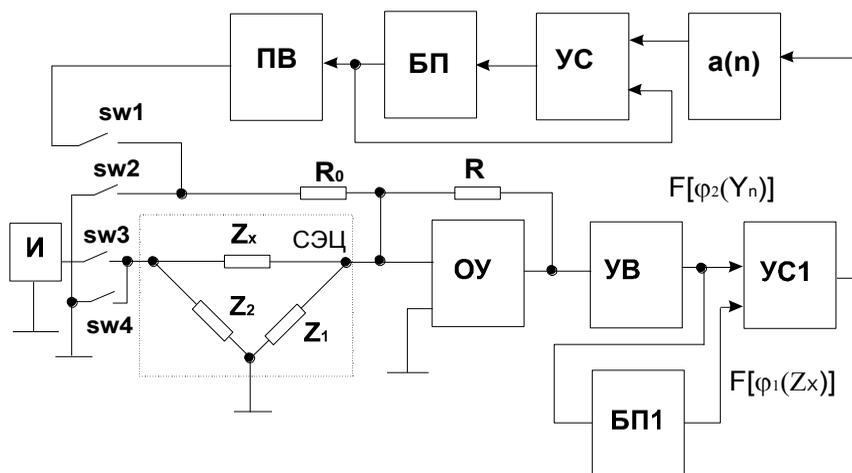


Рис. 3.16. Структурная схема измерительного преобразователя

Процесс итерационной коррекции для измерительного преобразователя такой структуры можно выполнить иначе, используя компенсационные методы, то есть методы приведения к нулю разности между преобразуемой и компенсирующей величинами.

В этом случае итерационная коррекция будет выполняться по алгоритму:

$$Y_{n+1} = Y_n - a(n)\{F[\varphi_2(Y_n) - \varphi_1(Z_x)] - F(0)\}. \quad (3.12)$$

Процесс итерационной коррекции по алгоритму (3.12) осуществляется в два этапа. На первом этапе переключатели SW2 и SW4 должны быть замкнуты, а переключатели SW1 и SW3 — разомкнуты. Вход ИП подключается к шине нулевого уровня и производится преобразование $F(0)$, значение которого запоминается в БП1. На втором этапе переключатели SW1 – SW4 меняют свое положение на противоположное. На вход ИП при этом поступают сигналы $\varphi_2(Y_n)$ и $\varphi_1(Z_x)$, которые вычитаются на ОУ. Затем получают значение $F[\varphi_2(Y_n) - \varphi_1(Z_x)]$ и в дальнейшем все операции аналогичны предыдущему алгоритму.

Оба метода итерационной коррекции как алгоритмически, так и по структуре эквивалентны друг другу.

Итерационные методы можно применять для организации режима электрического разделения преобразуемой ДЭЦ (Z_x) от шунтирующих элементов Z_1 и Z_2 .

Задача электрического разделения состоит в том, чтобы разность потенциалов между узлами 1 и 2 СЭЦ равнялась нулю. Тогда элементы Z_1 и Z_2 не будут оказывать влияния на напряжение в узле 1. Эту задачу будем решать итерационно. В отличие от предыдущих алгоритмов, значение результата $(n+1)$ -й итерации Y_{n+1} находится по результатам преобразований значений результатов двух предыдущих итераций Y_n и Y_{n-1} , хранимых в БП2. На первом этапе итерации на СЭЦ воздействует сигнал $\varphi(Y_{n-1})$, и получают значения преобразования $F[\varphi(Y_n)]$. По полученным значениям $F[\varphi(Y_{n-1})]$ и $F[\varphi(Y_n)]$, а также по результату n -й итерации Y_n вычисляется новое значение результата $(n+1)$ -й итерации Y_{n+1} . С увеличением n разность $Y_{n+1} - Y_n$ стремится к нулю. Это означает, что получена точка $Y_n = Y_{n-1} = Y^*$, значение Y^* зависит только от значения напряжения в узле 1 СЭЦ, определяемой параметрами преобразуемой ДЭЦ Z_x .

Описанный преобразователь имеет нелинейную зависимость коэффициента передачи прямой цепи от параметров преобразуемой ДЭЦ.

Чтобы получить нелинейную зависимость для ИП, необходимо, чтобы источник тестового воздействия был источником тока и отсутствовал образцовый резистор R_0 . При этом в режиме заданного тока коэффициент передачи ИП будет $Y = KI_0Z_x$.

3.9. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОНТРОЛЕПРИГОДНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Характерной тенденцией развития является постоянное повышение сложности РЭА. Это приводит к усложнению задачи их диагностирования. Эффективным подходом к решению этой задачи может быть проектирование устройств, специально приспособленных для этой цели.

Под контролепригодностью в широком смысле понимают качество объекта диагностирования (ОД), состоящее в приспособленности для проведения всех операций, которые, в свою очередь, входят в процесс диагностирования. С этой точки зрения, контролепригодность обеспечивает хорошую автоматизацию синтеза тестов, хорошую локализуемость дефектов (минимум операций поиска неисправностей) и способность к самодиагностике.

Различают три уровня в обеспечении контролепригодности ЭУ.

К первому уровню относят ЭУ, у которых приведение схемы к контролепригодному виду предполагает минимальные изменения схемы для улучшения управляемости и наблюдаемости ее внутренних узлов.

Для устройств второго уровня улучшение управляемости и наблюдаемости достигается путем введения 5-20 % дополнительного оборудования.

Электронные устройства, синтезированные с возможностью самодиагностирования, относятся к третьему уровню контролепригодности.

Обеспечение контролепригодности аналоговых ИС рассмотрим на примере контроля ОУ, которые в силу своей универсальности могут использоваться в ОД как повторители V , инвертирующие и неинвертирующие усилители напряжения, различные устройства сравнения. Всё это затрудняет систему диагностирования. С другой стороны, ОУ в ОД можно рассматривать как некоторый решающий усилитель, который называется ОУ с решающей цепью, состоящей из узлов цепи

ОС и цепи связи с источником входных сигналов, выполняющим ту или иную математическую операцию. Обобщенная структурная схема такого решающего усилителя произведена на рис. 3.17.

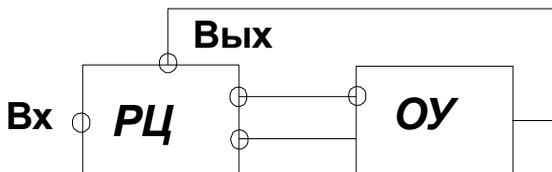


Рис. 3.17. Структурная схема решающего усилителя

Если разорвать связь между инвертирующим входом ОУ и решающей цепью (РЦ), то можно полностью выделить его из ОД и проконтролировать; чтобы это сделать, есть один из известных методов, например в режиме инвертирующего усилителя. При этом РЦ не будет оказывать никакого влияния. Достоинством решения такой задачи является простота средств диагностирования, обусловленная единым методом контроля любых ОУ.

Диагностирование ОУ в решении инвертирующего усилителя представлено на рис. 3.18.

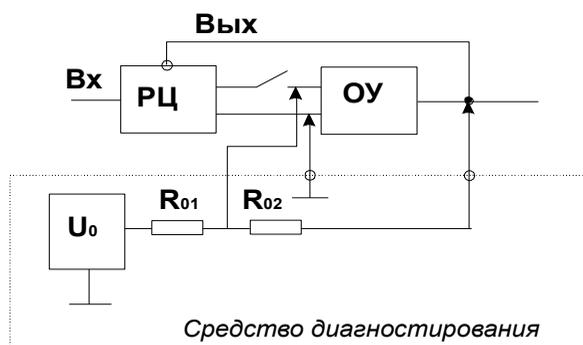


Рис. 3.18. Инвертирующий усилитель

Перед включением напряжения питания на ОД для проведения контроля на правильность функционирования ИС целесообразна проверка на правильность их установки. Это обусловлено тем, что включение питания на ОД при неправильной установке одной ИС может привести к выходу из строя других ИС.

4. СИСТЕМЫ ТЕХНИКО-ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ И УСТРОЙСТВА СОПРЯЖЕНИЯ

4.1. СИСТЕМА ТЕХНИКО-ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Совокупность подверженных изменению в процессе производства или эксплуатации свойств объекта носит название — техническое состояние объекта (ТСО). Видами ТСО являются состояние исправности, работоспособности, неисправности, неработоспособности, функционирования и т. д.

Процесс определения ТСО с определенной точностью называется техническим диагностированием (ТД).

Контроль технического состояния — это определение вида ТСО. Для его определения необходимо знание ТСО, определенного путем диагностирования, и наличие требований, которые характеризуют исправное состояние путем задания в технической документации номенклатуры и допустимых значений количественных и качественных свойств объекта. Номенклатура свойств изделия должна содержать диагностические параметры, которые будут достаточны для проведения тех видов диагностирования, требующихся в условиях эксплуатации данного устройства.

Таким образом, ТД может быть самостоятельным процессом при обследовании объекта с показателями, которые не были установлены заранее, определяющими вид состояния, а также могут быть частью процесса при контроле или при прогнозировании технического состояния.

ТД реализуется путем измерения количественных значений параметров, анализа и обработки результата в измерении и управлении радиоэлектронных систем в соответствии с алгоритмом диагностирования.

ТД осуществляется в системе технического диагностирования (СТД), представляющей собой совокупность средств и ОД и при необходимости самих исполнителей, подготовивших к диагностированию и осуществляющих его.

Составляющими системы являются объект технического диагностирования (ОТД), под которым понимают изделие или же его составные части, ТСО которых подлежит определению, а также средства ТД, которое представляет собой совокупность измерительных приборов, средств коммутации и сопряжения с объектом технического диагностирования.

Система ТД работает в соответствии с алгоритмом технического диагностирования, который представляет собой совокупность предписаний о проведении диагностирования.

Условия проведения ТД, которые включают в себя состав диагностических параметров (ДП), а также их предельно допустимые наименьшие и наибольшие критические значения, периодичность диагностирования изделия и эксплуатационные параметры применяемых средств, определяют режим ТД и контроля.

4.2. КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ ТЕХНИКО-ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Системы ТД могут быть различными по своему значению, структуре, месту установки, составу, конструкции, схмотехническим решением. Они могут быть классифицированы по ряду признаков, определяющих их назначение, задачи, структуру, состав технических средств: по степени охвата объекта ТД; по характеру взаимодействия между объектом ТД и системой ТД; по используемым средствам ТДК; по степени автоматизации объекта ТД.

По степени охвата СТД делятся на локальные и общие. Под локальными понимают системы ТД, решающие одну или несколько задач, например определение работоспособности или поиск места отказа. Общие системы ТД могут решать все поставленные задачи диагноза.

По характеру взаимодействия объекта ТД и СТД делят на: системы с функциональным диагнозом, в которых решение задач диагностики осуществляется в процессе функционирования объекта ТД по своему назначению, и системы с тестовым диагнозом, в которых решение задач диагностики осуществляется в специальном режиме работы объекта ТД путем отдачи на него тестовых сигналов.

По используемым СрТД системы ТД можно разделить на:

- системы с универсальными средствами ТДК;
- системы со специализированными средствами;
- системы с внешними средствами, в которых средства и объект ТД конструктивно отделимы друг от друга;
- системы со встроенными средствами, в которых объект ТД и СТД конструктивно представляют одно изделие.

По степени автоматизации системы ТД можно разделить на:

- автоматические, в которых процесс получения информации о техническом состоянии объекта ТД осуществляется без участия оператора;
- автоматизированные, с частичным участием оператора;
- неавтоматизированные, в которых получение и обработка информации осуществляется человеком.

Аналогично могут классифицироваться и СрТД: автоматические, автоматизированные, ручные.

Применительно к ОТД, так системе ТД должны: предупреждать постепенные отказы; выявлять неявные отказы; осуществлять поиск неисправных узлов, блоков и локализовать место отказа. Процесс ТД в системе управления качеством подразделяют на три составляющие:

- генезис — процесс определения технического состояния ОТД с определенной точностью на заданном в прошлом временном интервале;

- диагноз — процесс определения технического состояния объекта в данный момент;
- прогноз — процесс определения технического состояния объекта ТД в будущем на конечном временном интервале с заданной достоверностью.

4.3. СТРУКТУРА СИСТЕМ ТДК

Развернутая структура системы ТД представлена на рис. 4.1.

Функциональными элементами системы ТД являются: 1 — датчики сигналов, 2 — линии связи, 3 — коммутаторы, 4 — преобразователи, 5 — измерительный прибор, 6 — индикатор, 7 — дискриминатор, 8 — поле допусков, 9 — индикатор вида технического состояния, 10 — управляющее устройство, 11 — стимулирующее устройство, 12 — прогнозирующее устройство.

В центре системы ТД — объект технического диагностирования, а также средства диагностики и контроля.

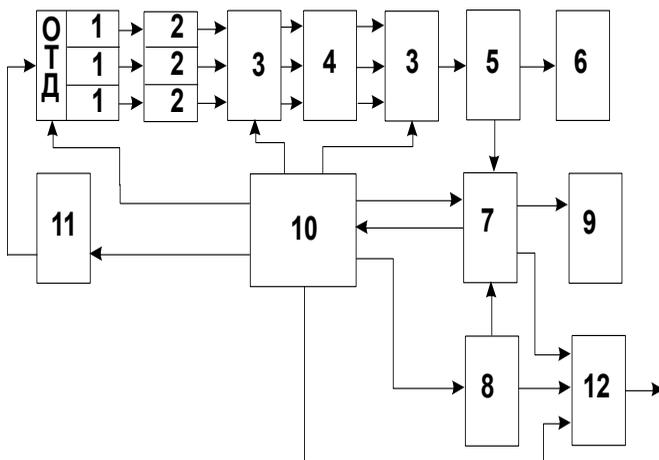


Рис. 4.1. Структура ТД

Первой операцией процесса диагностирования является выведение сигналов, параметры которых характеризуют состояние системы. Эта операция осуществляется с помощью датчиков информации. Посредством линий связи информация транслируется в средство ТД. Главной подсистемой средств ТД является измерительное устройство, но поскольку оно не может измерять все виды параметров сигналов радиоаппаратуры, то составными элементами средств ТД являются коммутаторы и преобразователи. На выходе измерительного устройства формируется информация о техническом состоянии РЭС. Она может быть представлена человеку или же автоматически обработана машиной для дальнейшего использования.

Важным элементом такой обработки является операция сравнения представляемой информации с полем допусков для вынесения решения о виде технического состояния диагностируемого изделия. После принятия решения осуществляются еще две операции: операция управления качеством изделия и операция стимулирования.

4.4. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И АЛГОРИТМЫ ТЕХНИКО-ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Техническое состояние радиоаппаратуры характеризуется совокупностью признаков, зависящих от количественных и качественных характеристик элементов РЭА. Число состояний изделия определяется числом состояний функциональных элементов и их связями.

Изделие РЭС может быть представлено: полем состояний $(S(t))$; матрицей состояния системы $|| S_{ij} ||$; совокупностью выходных сигналов $U(t)$. Поле сигналов образует информационное поле $I(S)$. На основе сигнальной информации принимается решение о ТСО – $S^*(t)$. Далее выделяется управляющая информация и происходит управление состоянием $S(t)$.

Изделие из состояния $S(t)$ переходит в состояние $S(t + T)$, процесс диагностирования реализуется на основе непрерывного или периодического контроля.

Алгоритм процесса может быть описан следующей цепочкой:

$$S_1 \rightarrow I(S_1) \rightarrow I(U_1) \rightarrow I^*(U_1) \rightarrow I(S^*_1) \rightarrow I_y(S^*_1) \rightarrow S_2,$$

где S_1 — первоначальное состояние системы; $I(S_1)$ — информационное поле S_1 ; $I(U_1)$ — сигнальное информационное поле; $I^*(U_1)$ — объем информации на выходе измерительного устройства; $I(S^*_1)$ — информация о параметрах, характеризующих состояние системы; $I_y(S^*_1)$ — целенаправленное управление состоянием S_1 ; S_2 — конечное состояние диагностируемого объекта.

Далее детально алгоритм диагностирования и восстановления качества системы представлен на рис. 4.2.

На рис. 4.2 введены следующие обозначения: ОТД — объект технического диагностирования; N — шумы и помехи (аддитивные и мультипликативные); ИУ — измерительные устройства; ВУ — вычислительные устройства; ПрУ — управляемый параметр; РСС — радиоэлектронное системное средство.

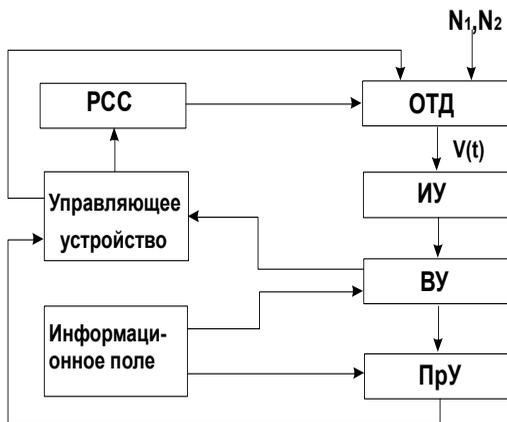


Рис. 4.2. Схема системы технико-диагностического контроля радиоэлектронных средств

Используется операторное представление процесса. Он позволяет: формализовать процесс; в каждом конкретном случае определить оператор преобразования информации; оптимизировать систему ТДК по частям.

Критерии оптимизации:

$\max I(S^*)$ — максимум информации о поле параметров;

$\max I^*(S^*)$ — максимум информации о поле состояний;

$\min[I(S^*) - I(S)]$ — минимальная погрешность определения поля параметров.

Различают две задачи диагноза: прямую (получение информации) и обратную (определение множества элементарных проверок). Согласно этому различают прямую и обратную задачи алгоритма диагностирования.

4.5. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНИКО-ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Особенности ТДК РЭС определяются главным образом объектами диагностирования: РЭУ и С могут быть разделены на системные, конструктивные, эксплуатационные.

Системные особенности РЭУ и С: широкий диапазон действующих токов и напряжений (0 Гц – 10^{11} Гц); широкий диапазон временных интервалов сигналов (10 с – 10^{-7} с); динамический диапазон действующих мощностей (170 – 190 Дб), излучаемых и принимаемых сигналов (10^6 Вт – 10^{-12} Вт); разнотипность физических процессов, протекающих в схемах и узлах РЭС; большой объем информации (до 10^5 бит/с) в единицу времени; функциональная избыточность; насыщенность эфира системами РЭ; разнообразие условий применения и высокая нестационарность.

Конструктивные особенности РЭУ и С: структурная сложность; последовательная структура подавляющего большинства элементов; высокая степень безотказности элементов и низкая себестоимость изделий в целом; уход параметров в процессе эксплуатации; скрытность физических процессов

и изменения параметров; значительный разброс параметров; необходимость восстановления параметров в процессе эксплуатации; наличие съемных, стационарных, взаимозаменяемых узлов и блоков. Исходя из этого, выделим следующие особенности СТД РЭС.

СТД РЭС сложна и состоит из сложных управляемых и управляющих подсистем; решение задач диагностики требует системного подхода; разнообразие и сложность средств диагностики и контроля; функциональная избыточность средств диагностирования; требование высокой точности и безотказности; высокая стоимость КПА и КИА и необходимость их ТО; разнообразие методов, видов и форм ТД; необходимость раннего упреждения отказов, выявление повреждений; необходимость разработки новых методов и средств прогноза развития отказов. Эти особенности являются наиболее отличительными.

4.6. ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ ТДК

Процесс ТД — неотъемлемая часть процессов обследования технических объектов (ОТО) и Р, поэтому многие показатели качества, характеризующие надежность РЭС и ее отдельные составляющие, могут являться одновременно показателями радиоаппаратуры как объекта ТД.

Поиск места отказа в процессе диагностирования характерен глубиной поиска дефекта, которую задают указанием составной части объекта или ее участка, с точностью, до которой определяется место дефекта. Характеризуется коэффициентом глубины поиска $K_{гп}$:

$$K_{гп} = F/R, \quad (4.1)$$

где F — число различных частей объекта на принятом уровне деления; R — число составных частей.

Операции диагностирования могут иметь такие показатели, как:

L — длина места диагностирования, определяемая числом элементарных тестовых воздействий;

$P_{i,j}$ — вероятность ошибки диагностирования вида (i,j) — объект диагностирования находится в состоянии i , а в результате диагностирования считается находящимся в состоянии j ;

D — вероятность правильного диагностирования — СТД определяет то техническое состояние, в котором действительно находится объект.

Кроме того, СТД могут характеризоваться точностью измерения РЭУ и С (определяется погрешностью измерений); точностью воспроизведения имитируемых сигналов; информационной производительностью; инструментальной достоверностью; разрешающей способностью; степенью автоматизации.

Точность средств измерений характеризуется среднеквадратичной ошибкой, все составляющие которой возникают за счет погрешностей цепей прибора.

Точность воспроизведения (выход) имитационных сигналов можно характеризовать погрешностями электрических и функциональных параметров.

Производительность — оперативная продолжительность диагностирования или количество объектов, диагностируемых за данный промежуток времени.

Разрешающая способность характеризует составляющую выходной информации, определяющую возможности разделения данных от двух различных источников.

Степень автоматизации показывает количество автоматизированных операций относительно их общего числа.

4.7. УСТРОЙСТВА СОПРЯЖЕНИЯ С ОБЪЕКТОМ

Организация взаимодействия объекта со средствами диагностирования

В современных автоматизированных системах диагностирования (АСД) электронной аппаратуры связь между объектом диагностирования (ОД) и измерительной аппаратурой может осуществляться с помощью механического сочленения и электрического подключения точек контроля ОД с выходом измерительного устройства либо бесконтактным съемом информации.

В АСД первого типа устройства сопряжения с объектом фактически включают в свой состав две основные группы устройств:

1. Устройства для механического и электрического подсоединения к ОД, ориентированные на конкретный тип ОД и учитывающие его конструктивные особенности, — контактные устройства (КУ).

2. Устройства для электрического подключения точек контроля на входе измерительного устройства АСД — коммутаторы (КМ).

КУ подразделяются на четыре класса: КУ, использующие для сочленения краевые соединители ОД; КУ, выполненные в виде одного или нескольких зондов, обеспечивающих доступ к отдельным внутренним точкам ОД; КУ типа «клипса», использующие для сочленения выводы ЭРЭ, игольчатые КУ типа «ложе из гвоздей», использующиеся для одновременного сочленения с большим числом контактных площадок, расположенных по всей площади ОД.

В настоящее время наиболее часто используются игольчатые КУ (ИКУ) типа «ложе из гвоздей» [3].

Современные ИКУ типа «ложе из гвоздей» содержат до нескольких десятков тысяч контактных штырьков, принимающихся в процессе контроля к контактным площадкам проводников с нижней стороны печатной платы, становящимся при этом контактными точками (КТ). Конструкции монтажных

штырьков могут быть различными. Наибольшее распространение получили штырки, выполняемые в виде подпружиненных контактных штифтов (КШ). На рис. 4.3 приведена конструкция контактного элемента, выполненного на основе подпружиненного КШ. Контактный элемент содержит гнездо 1, предназначенное для постоянной установки в канале 3, проходящем через пластину 2, установленную в КУ. Гнездо 1 установлено таким образом, что в него можно вставить подпружиненный штифт 5, состоящий из полой трубки 7, спиральной нажимной пружины 4, помещенной в эту трубку, и плунжера 6 с контактным наконечником, выступающим из одного конца трубки. С другой стороны к гнезду подключается монтажный провод, соединяющий КШ со входом коммутатора АСД.

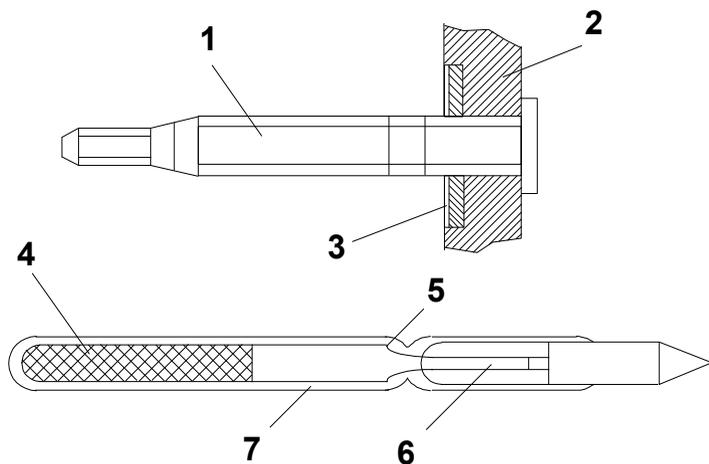


Рис. 4.3. Конструкция контактных штифтов

Особое значение имеет обеспечение минимального сопротивления контакта КШ с ОД, значение которого определяется усилием прижима КШ и может изменяться в довольно широких пределах при каждом очередном прижиге ОД. Наконечник КШ и поверхность контактирования обычно оказываются неровными, загрязненными и частично окисленными. Когда наконечник КШ преодолевает оксид и вступает в контакт с металлом, через него начинает протекать ток.

По мере усиления прижима наконечника КШ к поверхности ОД значения контактного сопротивления быстро падают, пока не достигнут точки перегиба (рис. 4.4). Эта точка определяет усилие прижима, обеспечивающего надежный контакт.

В связи с использованием в АСД слаботочных сигналов возникает необходимость в покрытии КШ благородными металлами, преимущественно золотом, образующими оксидную пленку в 2 нм.

Высококачественные КШ включают в свой состав планированную золотом пружину, позолоченную трубку и электролитический отполированный позолоченный плунжер [3].

Материал, из которого изготавливаются КШ, должен обладать низким сопротивлением и высокими механическими характеристиками: высоким коэффициентом упругости и пределом прочности при растяжении. Это такие материалы, как бериллий, медь, вольфрам, никелево-серебряный сплав, фосфористая бронза и нержавеющая сталь.

Хорошая электрическая проводимость, низкая химическая активность и высокая стабильность характеристик обеспечиваются при использовании плунжеров из бериллиевой меди. Коррозионная устойчивость таких плунжеров обеспечивается в результате покрытия их родием.

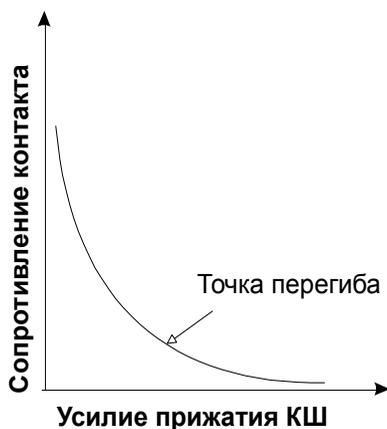


Рис. 4.4. Зависимость значения контактного сопротивления от усилия прижима КШ

Трубка КШ выполняется из планированного золотом никелево-серебряного сплава, гарантирующего покрытие золотом внешнего и внутреннего диаметров. Планирование золотом приводит к точности измерения.

Электрический контакт в КШ обеспечивается пружинной нагрузкой плунжера. Спиральная пружина КШ предназначена для обеспечения заданной силы давления на наконечник плунжера и необходимого контакта между внутренней поверхностью трубки и плунжером.

Для обеспечения надежного контакта наращивание силы прижима достигается выбором правильного сочетания между усилием сжатия пружины и формой наконечника плунжера. Типы наконечников: одноточечный обеспечивает усилие прижима 120 г на одну точку соприкосновения; трехточечный — только по 40 г на точку; КШ с цилиндрическим наконечником ($\varnothing 1.5$ мм, площадью поверхности 1.76 кв.мм. и усилием пружины 120 г) развивает пропорционально распределенное по всей площади наконечника усилие прижима 68 г на кв.мм; КШ с игольчатым наконечником ($\varnothing 0.125$ мм, $S = 0.012$ кв.мм и усилием пружины 120 г) развивает усилие прижима в 10 кг/мм^2 [1].

Длина рабочего пути плунжера не должна превышать 5 мм. Выбор конструкции КШ зависит от самого ОД и от плотности расположения контактных площадок. При уменьшении расстояния между контактными площадками до 0.25 мм используют конструкции: кронштейно-игольчатый щуп и столбик Эйлера.

Кронштейно-игольчатый щуп представляет собой провод маленького диаметра, согнутый в форме L (рис. 4.5, а), и позволяет контролировать точки с расстояниями между центрами 0.125 мм. Длинный конец L прикрепляется к опорной пластине в горизонтальном положении и отклоняется как кронштейнная балка, когда вертикальная сила прикладывается к его короткому концу.

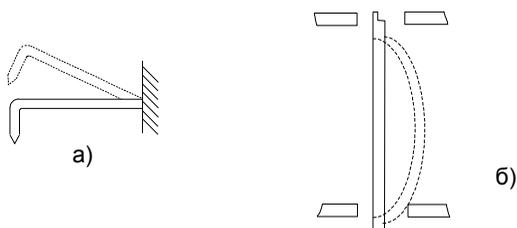


Рис. 4.5. Контактные зонды специальных конструкций:
а – кронштейно-игольчатый щуп; б – столбик Эйлера

Столбик Эйлера представляет собой длинную узкую проволоку, установленную вертикально (рис 4.5, б) и поддерживаемую с обоих концов. Приложение силы к верхнему концу вызывает изгиб зонда в средней точке. Столбик Эйлера обеспечивает доступ к гибридным сборкам с центрами КТ, расположенными на расстояниях $1.25 \div 0.25$ мм.

При переходе столбика Эйлера из прямого состояния в изогнутое его плоская поверхность переходит из положения, параллельного по отношению к контактной площадке, к положению под углом и край штырька вонзается в площадку. Сцарапывание слоя оксида важно при зондировании с малым усилием прижима, отсутствие его является основным недостатком подпружиненных штифтов [3].

4.8. НАДЕЖНЫЕ КОНТАКТНЫЕ УСТРОЙСТВА ИГОЛЬЧАТОГО ТИПА

ИКУ выполняются конструктивно в виде сменного адаптера, представляющего собой поле контактных штырей, установленных в точках раstra соответствующих месторасположению контактных площадок объекта. Каждый из штырей распаивается к выходному соединителю адаптера; технических средств, обеспечивающих фиксацию адаптера, подключение его выходного соединителя к входному соединителю, коммутатора АСД, а также прижим игольчатых штырей адаптера к контактным площадкам ОД.

Выпускаются три основных типа ИКУ типа «ложе из гвоздей», различающихся по способу приведения их в действие: вакуумные, механические (с ручным приводом) и пневматические.

Вакуумные ИКУ имеют минимальные габаритные размеры и стоимость. Проверяемый печатный узел удерживается в контакте с контактным штырем при помощи вакуумной системы, откачивающей воздух из приспособления. Вакуумные ИКУ обеспечивают наиболее равномерный прижим по всей площади ОД, исключая необходимость в установке над контролируемой платой специальной прижимной крышки, которая в процессе контроля опускается на ОД, обеспечивая равномерное распределение давления на плату. Основным недостатком вакуумных ИКУ является ограничение развиваемой ими силы прижима, которая не может превосходить атмосферного давления. В связи с этим максимальная плотность расположения КШ не может превышать значения 8 штырей/см². Использование большего числа КШ приводит к снижению силы прижима до 120...160 г на 1 штырь, вследствие чего могут возникнуть проблемы с обеспечением надежного электрического контакта.

Механические ИКУ с ручным приводом позволяют работать с более плотно размещенными штырьками. Сила прижима ограничивается только длиной рычага привода и усилиями, затрачиваемыми оператором. Механические ИКУ имеют, по сравнению с вакуумными, более сложную конструкцию, большие габаритные размеры, более сложны в эксплуатации, что отражается на увеличении времени контроля.

Пневматические ИКУ во многом подобны механическим. Прижим обеспечивается сжатым воздухом, поэтому усилие прижима может быть выбрано сколь угодно большим. Пневматические ИКУ не требуют решения проблемы утечки воздуха, как вакуумные, быстрдействие их выше, оно ограничивается лишь требованиями выполнения условий неповреждения контактных штырьков и составляет 1.5...3 с. Недостаток пневматических ИКУ — высокая стоимость.

Основной сложностью при разработке любых типов ИКУ является обеспечение минимальных допусков на установку КШ. Допуски вводятся на каждую подвижную деталь ИКУ, причем необходимо учитывать расширение допусков, вызываемое изгибом детали при эксплуатации КУ. Поэтому стремятся уменьшить число подвижных деталей ИКУ, насколько это возможно.

Для определения целесообразного места расположения направляющих штырьков используют формулу

$$T = S - E + (L - N) - (P/5), \quad (4.2)$$

где S — размер пробника; E — длина выступающей части выводов ЭРЭ; L — размер контактной площадки; N — допуски изготовления платы; P — расстояние между прилегающими контактными площадками и (или) печатными проводниками.

При $T < 0.3$ мм направляющие штырьки устанавливаются на основание адаптера, при $T > 0.5$ мм устанавливаются на пластине диафрагмы, при $0.3 \leq T \leq 0.5$ — место расположения направляющих штырьков выбирается по усмотрению пользователя.

Качество контакта с ОД определяется уровнем сжатия КШ, задаваемым стопорящими прокладками ИКУ. Материал, из которого изготавливается стопорящая прокладка, должен обладать при малой толщине высокой твердостью для обеспечения поддержки ОД в заданном положении и предотвращения износа и царапин, наносимых выводами элементов в процессе контроля. Указанным требованиям удовлетворяет неопреновая резина.

Важное значение имеет возможность доступа к монтажу и контактными штырькам ИКУ в процессе проведения проверок. Наибольшее распространение здесь получили однопластинчатые ИКУ, открывающиеся на 180° для обеспечения прямого доступа к элементам монтажа от контактной панели до КШ. Такая конструкция ИКУ облегчает его отладку, автоматически производит распайку ИКУ.

В настоящее время наибольшее распространение получили системы комбинированного диагностирования (СКД), обеспечивающие выполнение поэлементных и функциональных проверок ОД. Необходимость проведения поэлементной диагностики приводит к тому, что ИКУ включает в свой состав до нескольких тысяч КШ. Однако при проведении функциональных испытаний ОД наличие большого числа прижатых к нему КШ обуславливает проявление в схеме нежелательных индуктивно-емкостных эффектов, искажающих результаты испытаний. Поэтому важно, чтобы в процессе функциональных испытаний с ОД контактировали только те КШ, которые необходимы для осуществления функциональных проверок. Такую возможность обеспечивают специально разработанные двух- или более ступенчатые ИКУ.

Также большое распространение получили универсальные ИКУ. В условиях постоянного увеличения номенклатуры диагностируемых изделий изготовление отдельного адаптера для каждого типа ОД становится слишком дорогим. Затраты обуславливаются большим числом используемых КШ, позолоченных и изготавливаемых в строгих пределах допусков. Поэтому экономически оправданным является создание универсального ИКУ, используемого для контроля ОД различных типов. Недостатком универсального ИКУ является необходимость соединения каждого КШ с выходным соединителем адаптера [3].

4.9. КОНТАКТНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ С ПОВЕРХНОСТНЫМ МОНТАЖОМ

Технология монтажа на поверхность (ТМП) обеспечивает повышение плотности компоновки элементов в 4 раза и улучшение частотных характеристик ПУ.

Сборку ПУ производят по смешанной технологии, причем для обеспечения электрического и механического контакта между ТМП-компонентами и проводящими дорожками печатной платы используют два основных способа: пайку волной припоя и метод оплавления полуды.

В первом случае ТМП-компоненты приклеивают к нижней стороне платы специальным клеем, а обычные выводные элементы устанавливают на верхней стороне платы и паяют волной.

В результате получается ПУ с ТМП-компонентами, установленными на нижней, и обычными ЭРЭ, установленными на верхней стороне платы.

При пайке оплавлением полуды ТМП-компоненты размещают на поверхности платы. Паяльная паста распределяется по контурам компонентов, задаваемым трафаретами, после чего осуществляется установка компонентов и сушка пайки. Пайка оплавлением полуды осуществляется одним из методов, использующих инфракрасные лучи, тепловую проводимость или испарения. Выводные ЭРЭ добавляются на поверхность платы и паяются волной. В результате все компоненты оказываются смонтированными на одной стороне платы.

Малый шаг размещения выводов ТМП-компонентов и токопроводящих дорожек является причиной значительного числа КЗ, возникающих в ПУ при пайке волной припоя. Кроме того, при использовании ТМП часть элементов в печатном узле по окончании его сборки может отсутствовать. На плате могут оказаться неверно ориентированные компоненты и компоненты с номинальными значениями, не соответствующими технической документации, поскольку многие типы ТМП-компонентов не имеют маркировки. Недостаточное количество адгезива или паяльной пасты может приводить к сдвигам компонентов.

Контроль ТМП-узлов с использованием ИКУ представляет сложную задачу. Каждый КШ должен обеспечивать надежный низкоомный контакт с соответствующей КТ ОД. При этом поверхность КТ должна быть доступна для КШ. В настоящее время механические конструкции могут изготавливаться с допусками 0.025...0.2 мм. При наклейке ТМП-компоненты могут сдвигаться на 0.25 мм. При этом точность позиционирования КШ должна гарантировать обеспечение контакта с выводами элементов шириной не более 0.5 мм.

Для обеспечения доступа к каждому компоненту необходимо проектировать тестовые площадки (ТП). Для осуществления доступа к ТМП-компонентам необходимо проектировать специальные тестовые контактные площадки, причем идеальные ТП должны отстоять от площадок любых компонентов и связываться с ними узкими дорожками. Альтернативно ТП могут располагаться на обратной стороне платы, связываясь переходными отверстиями. Наличие ТП усложняет компоновку плат и потребляет значительную полезную площадь платы, при этом необходимо использовать ТП с минимальными размерами. Минимальный размер ТП, к которой может быть обеспечен доступ со стороны КШ, рассчитывается по сумме допусков на плату, ИКУ и КШ.

Важным моментом является правильная разметка платы, удовлетворяющая требованиям к размещению базовых отверстий и ТП. Допуск на размещение ТП относительно базовых отверстий не должен превышать 0.05 мм. Допуск на диаметр базового отверстия в этом случае не должен превышать +0.025/-0 мм и допуск на диаметр ТП ± 0.05 мм. Высота компонентов должна быть не более 6.25 мм. Для компонентов с высотой, превышающей 6.25 мм, вокруг каждой ТП должна находиться свободная область в 0.5 мм. Это предотвратит КЗ между компонентами при наихудшем соотношении допусков. Кроме того, вокруг каждой ТП должен быть зазор в 0.45 мм, свободный от компонентов или других препятствий. Этим минимизируется возможность шунтирования наконечников КШ тестовыми площадками, вызывающего регистрацию КЗ.

При контроле плат со смешанной технологией важно учитывать следующие допуски: плотность платы ИКУ со стороны сверления; допуски на отверстия патронов (на диаметр и перпендикулярность к плоскости КШ); допуск центровки между положением установочного штыря и высверленными отверстиями патронов; допуск центровки положения установочного штыря на плате штырей и соответствующего отверстия на контролируемой плате; допуск на положение установочного штыря относительно ТМП-компонента (для плат без высверленных базовых отверстий).

При выборке КШ для оснастки ТМП-плат необходимо обеспечивать минимальную погрешность радиального зазора.

Радиальный зазор (качание КШ) обозначает перемещение наконечника КШ, возникающее в результате наличия зазора между стержнем КШ и патроном. Радиальный зазор может увеличить допуск на оснастку на ± 0.127 мм или более.

Суммирование этих допусков приводит к увеличению минимального размера ТП до 0.43 мм. Дальнейшее увеличение размера ТП связано с допуском на перпендикулярность, оказывающим особое влияние при тестировании плат. При этом минимальный размер ТП увеличивается еще на 0.1778 мм. Результирующая погрешность при вставлении патронов в плату составит ± 0.06048 мм, что дает в сумме 0.8382 мм ТП.

Считая, что не учтенные в расчетах факторы, такие как погрешность плоскости платы, термический коэффициент расширения штырьковой платы и не ОД, не превысят допуска ± 0.0518 мм, минимальный размер ТП, который может быть осуществлен доступом в ТМП-платах, составит 0.89 мм в диаметре [3].

4.10. ЭЛЕКТРОННЫЕ КОММУТАТОРЫ

При проектировании структурных схем коммутаторов (КМ) следует учитывать ряд особых требований, таких как: универсальность; отказоустойчивость; высокая контролепригодность.

Требование к универсальности обуславливается необходимостью реализации автоматизированного режима подготовки программ диагностирования узлов электронной аппаратуры (ЭА) в режиме самообучения системы контроля. При этом в процессе контроля должна обеспечиваться возможность соединения любого требуемого входа (из общего числа n) коммутатора с любым его заданным выходом (из общего числа k), вне зависимости от числа соединителей уже установленных, то есть КМ должен обладать свойством полнодоступности.

Под универсальным КМ понимается такой КМ, который, будучи установлен в АСД, не налагает никаких ограничений на порядок подключения КТ ОД и измерительных каналов самой АСД по входам и выходам КМ.

Специализированный КМ таким свойством не обладает, а поэтому при подключении к его входам КТ ОД необходимо придерживаться определенного порядка и правил, определяемых структурой самого коммутирующего устройства и внутренней структурой ОД.

В общем случае универсальной является такая структура КМ, когда каждый из его n -входов непосредственно связывается с каждым из k -выходов. Однако при этом число ключей, необходимых для размещения КМ, определяется сильно большой величиной $N_0 = nk$. Поэтому предпринимают попытки разработки коммутирующих устройств, обладающих достаточно высокой степенью универсальности с точки зрения решения конкретных задач, стоящих перед определенной АСД. Избыточностью КМ является $Q = N_{0/n}$.

Для универсального коммутирующего устройства справедливо следующее утверждение: вероятность события, заключающегося в выборе такого подмножества входов универсального КМ, которые не могут быть скоммутированы к его заданным выходам, равна нулю. Соответственно, в качестве меры степени универсальности КМ используется значение вероятности события, заключающегося в выборе такого подмножества его входов, которое может быть скоммутировано к его заданным выходам. Достоинством введенной меры является то, что она изменяется в пределах $0 \dots 1$ и полностью характеризует свойство универсальности КМ.

Вторым важнейшим требованием, удовлетворяющим структуре коммутатора, является обеспечение высокой контролепригодности и отказоустойчивости, даже если последние достигаются в результате увеличения избыточности Q коммутирующего устройства. Данное положение определяется тем, что одной из основных задач является разграничение обрывов электрических связей в ОД от дефектов устройства сопряжения

системы контроля. Для осуществления такого разграничения дефектов КМ должен предоставлять возможность доступа к заданному подмножеству КТ ОД с использованием различных совокупностей коммутирующих элементов либо производить контроль срабатывания любого ключа КМ, без осуществления каких-либо дополнительных внешних манипуляций, непосредственно в процессе контроля ОД.

Наиболее универсальной является структура исполнительной части КМ, приведенная на рис. 4.6. Такая структура обеспечивает возможность одновременного подключения произвольного числа КТ ОД из общего числа n к каждой из k измерительных шин АСД. При этом часть КТ может подключаться одновременно к нескольким измерительным шинам. Однако высокая избыточность $Q > k$ коммутатора, построенного по такой структуре, делает его практически неприемлемым. Кроме того, в реальных ситуациях такие широкие возможности от коммутаторов АСД не требуются [3].

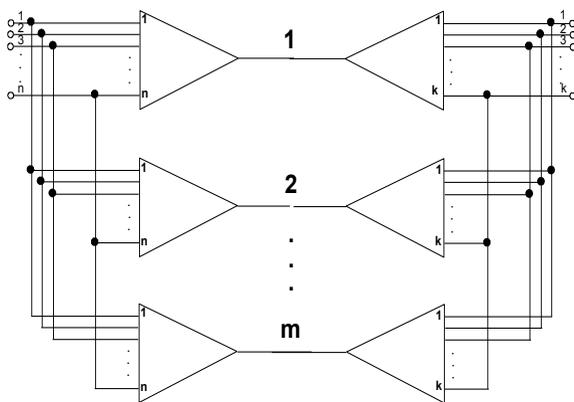


Рис. 4.6. Структурная схема исполнительной части универсального коммутирующего устройства

4.11. БЕСКОНТАКТНЫЕ УСТРОЙСТВА СОПРЯЖЕНИЯ

К основным методам бесконтактного диагностирования исследуемых ЭУ в настоящее время относят: оптические методы, в которых используется видимый спектр излучения; радиационные методы, использующие потоки ускоренных частиц; инфракрасные (тепловые) методы, основанные на контроле параметров излучения ИК-диапазона волн; электрические методы, которые основаны на анализе электрических свойств и параметров элементов ЭУ.

Оптические методы эффективно используются для выявления состояния поверхностей ОД, а именно выявления повреждений проводящего рисунка печатных плат, изменения конфигурации и взаимного расположения элементов ЭУ, обнаружения посторонних включений. Контроль качества ОД этими методами осуществляется в 2 этапа: съем информации о внешнем виде ОД и сжатие полученной информации с целью выделения и формирования изображения, подлежащего дальнейшему исследованию; обработка информации, полученной на первом этапе в соответствии с выбранными критериями отбраковки. Количество обрабатываемой информации определяется алгоритмами сжатия и критериями отбраковки, однако в любом случае ее объем значительно выше, чем при электрических методах.

Методы радиационного диагностирования по характеру взаимодействия с ОД используют активный метод прошедшего излучения. Для диагностирования ЭУ средства, реализующие эти методы, являются ограниченно пригодными.

Методы диагностирования в инфракрасном диапазоне базируются на том, что с помощью чувствительных индикаторов инфракрасного диапазона снимается картина теплового поля излучения исследуемого ЭУ в процессе работы. Подавляющее большинство процессов в ЭУ связано с выделением части всех форм энергии, превращающейся в тепловую. Интенсивность выработки тепловой энергии зависит от параметров элементов ЭУ, в том числе и от наличия в них

дефектов. Задача диагностирования ЭУ заключается в идентификации теплового поля ЭУ как ОД с эталонным полем. Эталонные тепловые поля могут быть получены как с помощью математического моделирования, так и экспериментальным путем.

Методы математического моделирования теплового поля разработаны недостаточно полно и дают значительные погрешности (более 50 %) из-за множества ограничений и допущений, и основными являются экспериментальные методы. Недостатками тепловых методов являются довольно значительные погрешности, так как в настоящее время имеются многоэлементные приемники излучения ИК диапазона со среднеквадратичным отклонением до 15 % для ЭУ из 10 элементов и до 30 % — для ЭУ из 100 элементов.

Электрические методы диагностирования основаны на исследовании электрических сигналов, поступающих с исследуемых ЭУ. В большинстве случаев на этапе эксплуатации ЭУ лакированы и нет возможности обеспечить гальваническую связь средств диагностирования с ОД. В этом случае диагностическую информацию получают при помощи различных датчиков, наибольшее распространение среди которых получили емкостные. Роль емкостных датчиков могут играть контактные площадки печатных плат диагностируемых ЭУ, к которым через защитный изоляционный слой (лаковое покрытие) приставлен щуп с металлической пластиной на конце.

К недостаткам электрических бесконтактных методов диагностирования следует отнести то, что такими методами невозможно измерять параметры пассивных элементов в связанных цепях, так как им нельзя создать режим электрического разделения.

Использование одних только бесконтактных методов диагностирования ЭУ как на этапе их производства, так и на этапе эксплуатации не даст необходимого эффекта. Однако их применение совместно с контактными методами поэлементного диагностирования и структурного диагностирования представляется весьма эффективным [3].

4.12. СРТД И КОНТРОЛЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Основные характеристики СрТД и контроля

СрТД и контроля (СрТДК) являются основной составной частью СТД и определяют эксплуатационно-технические характеристики данных систем, а также представляют всю необходимую информацию потребителя о техническом состоянии диагностируемых радиоприборов [2].

Классификация СрТДК может быть приведена по различным характеристикам (рис. 4.7). Классифицируя СрТДК как составную часть РЭС, их можно подразделить на средства:

- универсального применения и средства специализированного применения;
- встроенного контроля и средства с внешним контролем;
- автоматические, автоматизированные (40÷90 % выполняются автоматически); ручные.

По характеру решаемых задач различают ряд групп автоматических систем контроля. Первую группу составляют средства, решающие задачу контроля работоспособности объекта. Ко второй группе относят СрТДК, последовательно осуществляющие контроль работоспособности, поиск и локализацию неисправностей. К третьей — средства, обеспечивающие только поиск и локализацию неисправностей. Такие системы используются в процессе ремонта аппаратуры и при некоторых видах профилактических и регламентных работ. К четвертой — средства, прогнозирующие состояние работоспособности ОД. Данные системы используются для определения времени безотказной работы ОК и организации оптимальных программ поиска неисправностей.

По способу связи с объектом контроля СрТДК подразделяют на встроенные, внешние и смешанные.

Для встроенных автоматических систем контроля характерно электрическое и конструктивное объединение ОД и средств контроля; они применяются при проверке общей работоспособности ОД с индикацией или записью результатов. Такие

системы обеспечивают функциональный контроль основных устройств, определяющих работоспособность РЭС.

Внешние СрТДК не имеют ни конструктивных, ни контактно-электрических связей с ОД, информация о состоянии которого поступает в СДК за счет электромагнитных световых или тепловых излучений. Они автономны и применяются во время подготовки ОД. Основным преимуществом внешних СрТДК является возможность использования их для различных объектов.

Смешанные СрТДК имеют встроенные в объект датчики — преобразователи, которые обеспечивают получение информации о его состоянии, и конструктивно обособленные от ОД анализирующие устройства [2].

Многообразие технических решений при построении СрТДК непрерывно возрастает по мере разработки новых систем. В этих условиях большое значение приобретают вопросы выбора совокупности критериев, характеристик и параметров, по которым можно оценивать и сопоставлять различные СрТДК и в каждом конкретном случае выбирать наиболее рациональный вариант построения системы. Основными из этих характеристик следует считать те, которые определяют степень совершенства СрТДК при решении задач: контроля работоспособности, поиска места отказа, прогнозирования состояния и надежности.

Основными параметрами СрТДК следует считать: точность измерения РЭУ и С, количественно определяемое подмножество измерений (σ_v); точность воспроизведения имитирующих сигналов; информационную производительность; инструментальную достоверность; разрешающую способность; степень автоматизации.

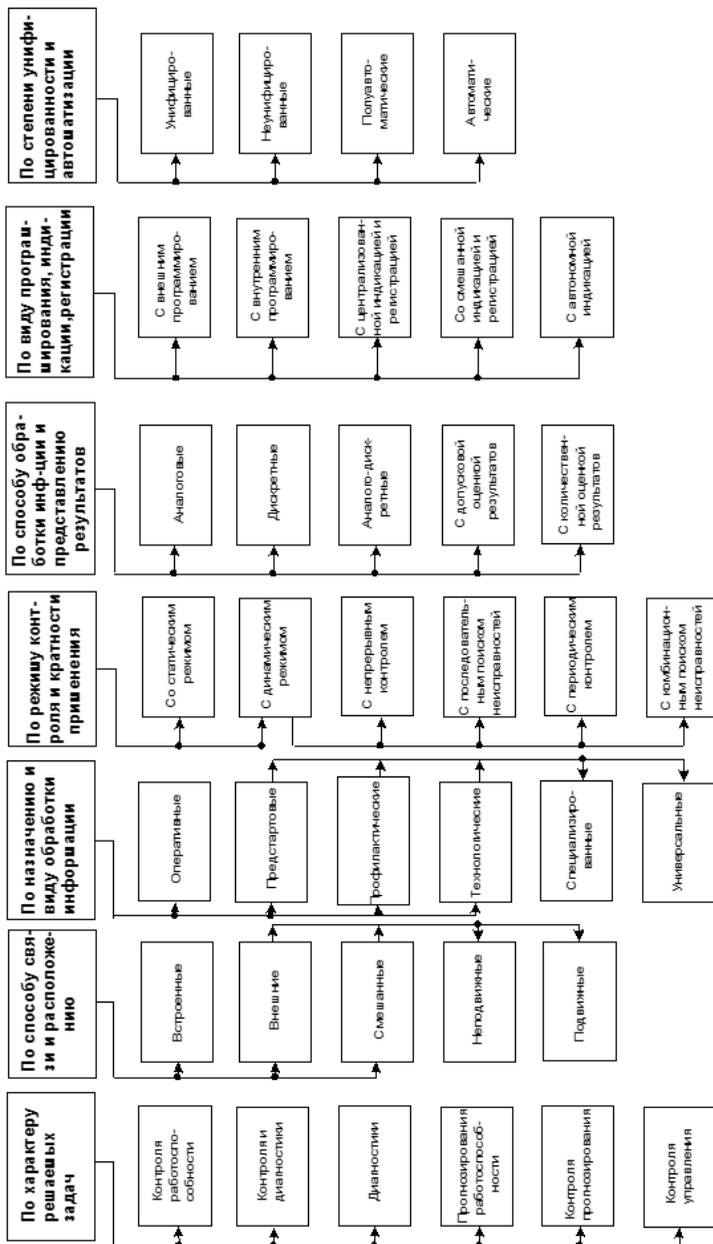


Рис. 4.7. Классификация средств диагностики и контроля

Встроенные СрТДК

Встроенный контроль ТС радиоаппаратуры всё шире используется в практике эксплуатации. Простейшие ВСК — индикаторы функционирования определенных трактов, в основном трактов питания РЭС, — являются ровесниками РЭС. В настоящее время на ВСК, помимо требований фиксации функционирования основных трактов, накладываются значительно более важные функции: проверка работоспособности РЭС по основным техническим параметрам, решение контрольных задач, поиск и локализация отказавших блоков сложной РЭС с индикацией отказа и автоматическим переключением на резервный комплект РЭС или РЭУ.

Одна из возможных структур ВСК приведена на рис. 4.8, на котором представлены схема ОД, состоящая из блока Бл1...Бл8, в которой сигналы на выходах Бл1,Бл2,...,Бл8 являются диагностическими параметрами, определяющими работоспособность; набор логических датчиков ЛД1...ЛД8 и индикаторное устройство отображения. Контролируемый сигнал на выходе каждого блока U_{R1} преобразуется, нормализуется и поступает на первый вход соответствующего ЛД, на второй вход которого подается опорное напряжение $U_{оп}$. Если напряжения U_{R1} и $U_{оп}$ обладают высокими потенциалами, то есть U_{R1} в норме, на выходе ЛД формируется потенциал Q на 1-ом выходе, если этого нет — формируется потенциал Q .

Когда ОД работоспособен, датчики блоков Бл3, Бл5, Бл8 выдают напряжение "И" и на ЛД1 поступает высокий потенциал. На входе ЛД1 формируется сигнал Q и светится индикаторная лампочка «РАБ». Другие сигнальные лампы при этом светиться не могут, так как вентили В1,...В14 заперты.

Отказ любого из блоков РЭУ приводит к появлению на выходе одного из Бл3,Бл5,Бл8 низкого потенциала, в результате чего лампа «РАБ» гаснет, схема переходит в режим локализации отказа и работает следующим образом. Допустим, что отказ произошел в Бл7, Бл3 при таком отказе выдает высокий потенциал, на выходе ЛД2 будет сигнал Q_2 , который

проходит через вентиль В1 и подготавливает вентили В3 и В4 к поступлению информации о результатах контроля выхода Бл4. Поскольку выход Бл4 также высокопотенциальный сигнал, Q3 (выход ЛД3) проходит через В3 и отпирает В5 и В6, обеспечивая поступление информации о контроле Бл5. При отказе Бл7 датчик Бл5 будет иметь на выходе низкий потенциал, соответственно, на выходе ЛД4 появится сигнал, который подготавливает к отпираанию В9 и В10. Контроль выхода Бл7 также дает низкий потенциал (на выходе ЛД6), и появление сигнала Q₆ обеспечивает свечение сигнальной лампы «ОТКАЗ 7». Ни одна из других ламп при этом включаться не будет. В рассмотренной схеме реализован допусковый контроль типа «годен – не годен» [2].

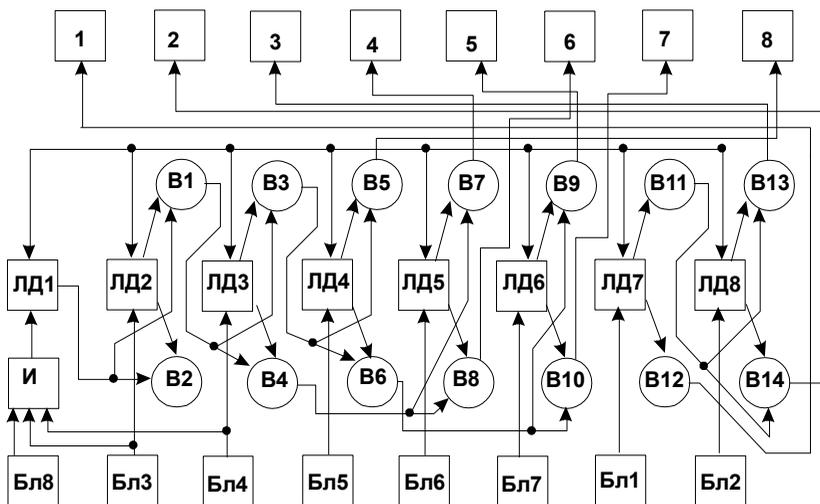


Рис. 4.8. Встроенные СртДК

Одна из основных задач ВСК состоит в предоставлении оператору РЭС возможности при нормальном функционировании ОД проверить его параметрическую работоспособность и инструментальную точность измерительных трактов.

Рассмотренная ВСК является примером решения частных задач диагностирования отдельных трактов РЭУ и С. Однако в настоящее время ВСК постоянно совершенствуются и занимают все более прочное место в единой СТО и ремонта радиоаппаратуры. Развитие ВСК имеет устойчивые тенденции и сформировавшиеся направления, по которым осуществляется их совершенствование. Основными из этих направлений следует считать: внедрение ВСК для контроля работоспособности (так как большинство внедренных в практику средств предназначены для контроля функционирования); увеличение полноты контроля; повышение достоверности информации о состоянии; наличие памяти и сопряжение с внешними диагностическими комплексами; использование микропроцессоров; применение ЦВМ.

Аппаратура

В последнее время получили большое применение цифровые измерительные приборы (ЦИП) различного назначения: вольтметры, частотомеры и др. В этих приборах полностью реализуются достижения современной радиоэлектроники; одним из важных достоинств ЦИП является наличие у них выхода в двоичном коде, позволяющего непосредственно сопрягать ЦИП с ЦВМ в качестве внешнего информационного датчика [2].

Одним из основных блоков цифрового вольтметра является электронный счетчик, состоящий из ряда счетных декад, каждая из которых составляется из четырех двоичных ячеек спусковых устройств (триггеров). Цепочка из четырех двоичных ячеек представляет собой схему пересчета на 16 (то есть каждые 16 отрицательных импульсов, поданных на вход схемы, вызывают один отрицательный импульс на выходе).

Погрешность цифрового вольтметра с импульсным преобразованием зависит от степени линейности пилообразного напряжения, стабильности частоты повторения счетных

импульсов и чувствительности сравнивающих устройств. Погрешность цифровых вольтметров при измерении постоянного напряжения составляет $\pm(0.02...0.1)$ %.

Имитаторами называют устройства, предназначенные для воспроизведения стимулирующих или функциональных сигналов в схемах диагностирования и контроля.

К категории имитаторов относят генераторы стандартных сигналов (импульсных и непрерывных) и генераторы доплеровских частот.

Для диагностирования трактов РЭС, в которых осуществляется обработка сигналов сложной структуры и выделение на их фоне полезных сигналов определенной конфигурации, применяются имитаторы, имеющие сложную структуру. Эти имитаторы состоят из двух частей: устройства математического моделирования отраженного сигнала и устройства физического моделирования отраженного сигнала на базе многочастотных и многофункциональных генераторов составляющих спектра детерминированной и случайной составляющей сигнала.

Одним из параметров построения имитатора для решения конкретных задач диагностирования является схема прибора КАСО-1 имитатора сигналов наземных РЛС. Основные эксплуатационно-технические параметры этого имитатора: несущая частота сигналов 837.5 ± 0.5 МГц; мощность сигналов в импульсе ≈ 7 мВт; нестабильность временных интервалов не более ± 0.2 мкс; погрешности допустимого контроля импульсной мощности не хуже 50 %; измерительная способность при контроле $\pm(0.3...1.2)$ мкс; погрешности измерений — электрического эквивалента датчиков высоты не более ± 0.05 %, несущих частот не более ± 500 кГц, интервал переменной высоты ± 10 %, питающих напряжений ± 5 %.

Для регулировки и испытаний радиоаппаратуры, которая устанавливается на подвижных объектах, а также диагностирования и восстановления РЭУ сложных РЭС наибольшее применение получила стендовая аппаратура различного назначения, структуры и мощности [2].

Стенды СДК могут подразделяться на:

- коммутационные, для настройки и регулировки РЭУ и С; для проверки РЭС на соответствие нормам технических параметров;

- для поиска метода отказа и восстановление;

- для динамических испытаний.

Для диагностирования многоблочных РЭС и их отдельных взаимозаменяемых устройств применяются стенды с эталонными компонентами аппаратуры, а также стенды с универсальной блочной структурой.

В настоящее время наибольшее распространение получили универсальные стенды для проверки компонентов РЭС, построенные на базе модульной конструкции.

Стенды для диагностирования РЭС комплекса состоят из стола, на котором размещается диагностируемое изделие, стационарной панели управления, комплекта сменных имитаторов и измерительных приборов и сменной панели коммутационно-измерительного модуля, индивидуально предназначенного для каждой отдельной РЭС.

Достоинством такого стенда является возможность быстрого подключения к системе диагностирования [2].

5. АЛГОРИТМЫ САМООБУЧЕНИЯ, ОЦЕНКА И КОНТРОЛЬ СИСТЕМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Решение таких важных задач, как массового выпуска высококачественных вычислительных машин самых различных типов, создания и освоения выпуска ряда новых ЭС и приборов автоматизации, предполагает под собой наличие соответствующего диагностического оборудования. Особое значение занимают вопросы автоматизации процессов поиска производственных дефектов при серийном и массовом изготовлении различных деталей для вычислительных машин, микросборок и других трудно диагностируемых радиоприборов.

Вездесущее применение персональных компьютеров, разработка мощных ОС, уход от некоторых сложных алгоритмов систем диагностики по элементам, а также развитие технологии потенциального распределения радиоэлементов позволили в середине 80-х годов получить необходимые условия для создания и серийного запуска приборов, служащих для анализа производственных дефектов, стоимость которых уменьшилась значительно, в сравнении с подобными типами систем. Развитие программного обеспечения, служащего для диагностирования дефектов в режиме самообучения анализаторами производственных дефектов, происходит в реальном времени. Наилучшая реализация процесса диагностики радиоэлектронных приборов с глубиной поиска дефектов до вида определённого дефекта отдельного элемента, который установлен на исследуемой плате, позволяет выполнить сбор необходимой информации, на основании которой можно получить оперативные решения о необходимости внести изменения в технологический процесс или же в конструкцию исследуемого прибора. Также можно получить прогноз для коэффициентов надёжности и качества для изучаемого прибора.

5.1. АДАПТИВНЫЕ СТДК

Одной из важнейших характеристик автоматизированной системы диагностирования (АСД) электронных устройств является трудоемкость подготовки программ диагностирования. Это привело к появлению систем диагностирования, обладающих свойством самоприспосабливаемости к объекту диагностирования (ОД). Это обеспечивается автоматическим изучением диагностических параметров эталонных объектов. Одним из первых самоприспосабливающихся АСД явились анализаторы производственных дефектов (АПД) [3].

Для составления программы диагностирования электронных устройств (ЭУ) необходимо располагать определенными сведениями как о нем, так и об основных характеристиках

АСД. Информация о ЭУ содержится в его диагностической модели, задаваемой в явном или неявном виде. Информация об АСД включает сведения о множестве реализуемых ею тестовых воздействий. Наличие такой априорной информации об ОД и процедуре диагностирования позволяет синтезировать оптимальную или квазиоптимальную программу диагностирования ЭУ, обеспечивающую диагностирование АСД с заданными показателями качества (производительностью, точностью измерения параметров, глубиной локализации и т. д.).

На практике встречаются ситуации, в которых трудоемкость получения полной информации априорной об ОД оказывается слишком высокой, а в отдельных случаях такая информация может отсутствовать.

В первом случае неизвестными оказываются некоторые параметры явно или неявно заданной модели ЭУ. И адаптивная АСД должна автоматически выполнить, восполнить недостающую информацию об объекте и по мере ее поступления изменить структуру и параметры тестовых операторов так, чтобы показатель качества функционирования АСД удовлетворял поставленным требованиям. После восстановления всей недостающей информации адаптивная АСД работает в обычном режиме, тестируя ЭУ с помощью полученной программы диагностирования.

Во втором случае имеются описание ЭУ и сведения о множестве реализуемых АСД тестовых воздействий. Однако диагностические модели неисправных и неработоспособных состояний отсутствуют, либо получение их требует слишком больших затрат времени и средств.

Возможно возникновение третьей ситуации, когда необходимая для построения программы диагностирования объекта информация не только не известна на начальном этапе, но и подвергается непредусмотренным изменениям в последующем.

В каждом из описанных случаев адаптивная АСД в процессе функционирования должна реагировать на изменение свойств ОД и, перерабатывая полученную информацию, приспосабливаться к новым условиям путем изменения пара-

метров тестовых программ или алгоритмов поиска дефектов так, чтобы показатель качества функционирования АСД находился в заданном диапазоне значений.

Процесс приспособления АСД к изменяющимся условиям работы называется адаптацией, а самоприспосабливающиеся АСД — адаптивными.

Использование принципов адаптивного управления позволяет получить тестовую программу заданного качества в условиях ограниченной исходной информации, а также обеспечить соответствие эффективности функционирования АСД заданному уровню в условиях изменяющихся свойств ОД.

Адаптивные АСД по степени приспособляемости ОД разделяются на ряд классов: самонастраивающиеся; обучающиеся; самообучающиеся; интеллектуальные.

Самонастраивающиеся АСД осуществляют автоматическое изменение параметров настройки технических средств или алгоритмов функционирования путем автоматического поиска оптимальной настройки, аналитического расчета необходимых значений параметров либо совмещения обеих указанных процедур. Поиск осуществляют, задавая пробные тестовые воздействия, в которых указывают отклонения параметров и измеряют соответствующие изменения показателя качества функционирования АСД.

Обобщенная схема адаптивной системы диагностирования представлена на рис. 5.1 и включает в свой состав устройство управления (УУ), устройство формирования целей (УФЦ), устройство организации поиска (УОП) и ОД.

Самонастраивающаяся АСД функционирует следующим образом: УУ выдает на ОД тестовые воздействия, отклик на которые поступает на УФЦ; УФЦ обрабатывает его, сравнивает с ожидаемым и по показателям ОД оценивает качество функционирования АСД и вырабатывает показатель цели $R(t)$. По заданному алгоритму управления, соответствующему $R(t)$, УОП самонастраивающейся АСД вырабатывает командные сигналы $g(t)$, приводящие к выработке УУ нового тестового воздействия либо к переходу УУ на альтернативный алгоритм

диагностирования объекта, приближающий АСД к заданному значению вектора показателей качества выполнения ею своих функций.

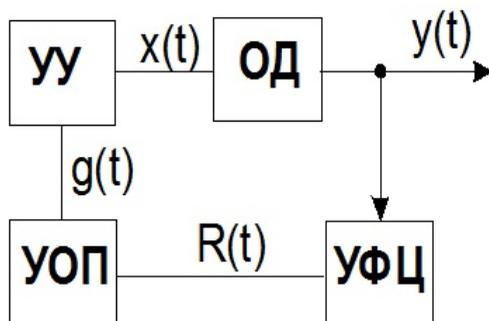


Рис. 5.1. Обобщенная структурная схема адаптивной АСД:
 $R(t)$ – показатель цели управления; $g(t)$ – командные сигналы;
 $x(t)$ – тестовое воздействие

Когда говорят об обучении, имеют в виду существование цели, которая должна быть достигнута в результате обучения.

5.2. ПРОГРАММА АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОИСКА ДЕФЕКТОВ

Одним из основных преимуществ адаптивных АСД является высокая степень автоматизации процесса подготовки программ диагностирования, которая достигается реализацией режимов их самонастройки и самообучения. В настоящее время наибольшее развитие принципы подготовки программ диагностирования в режиме самообучения АСД получили в АПД. Это обуславливается двумя причинами:

- присущей АПД возможностью представления программ диагностирования ЭУ в виде последовательности базовых подпрограмм контроля типовых ЭРЭ;
- ограничением функций АПД задачей обнаружения только производственных дефектов.

При этом процедура самообучения сводится к решению двух основных задач:

- 1) эталонного ЭУ на множество двухполюсных цепей;
- 2) распознаванию номинальных значений параметров двухполюсников, выполняемому с использованием специальных алгоритмов реализуемого в АПД метода электрического разделения.

Программа поэлементного диагностирования узла РЭА может быть представлена в виде массива линейно связанных списков:

$$\theta = \langle \Omega 1, \Omega 2, \dots \Omega i, \dots, \Omega S \rangle. \quad (5.1)$$

Каждый список $\Omega i = \langle \omega ij \rangle, j = 1, 9$, представляет тестовый оператор и состоит из последовательности символов, характеризующих свойства тестируемого ЭРЭ, где $\omega i1$ — тип контролируемого ЭРЭ; $\omega i2$ — его порядковый номер; $\omega i3$ — номинальное значение параметра; $\omega i4$ — единица измерения параметра; $\omega i5$ — величина поля допуска; $\omega i6$ — адрес элемента; $\omega i7$ — код измерительной схемы; $\omega i8$ — код задержки; $\omega i9$ — номера дополнительных контрольных точек (КТ) ЭУ, используемых для обеспечения заданной точности измерений.

В тестовом операторе можно выделить три основные группы данных:

- о контролируемом ЭРЭ ($\omega i1, \dots, \omega i5$), совпадающем с соответствующим компонентом $k_i \in \tilde{A}$ сетевой модели N габаритного узла РЭ;

- об условных номерах КТ ОД, связанных с точками подключения выводов контролируемого ЭРЭ к плате ($\omega i6$), которые могут быть получены из матрицы L связей сетевой модели N ЭУ;

- о типе измерительной схемы и дополнительных точках подключения измерительной аппаратуры, обеспечивающих заданную точность измерений ($\omega i7, \omega i8, \omega i9$).

Таким образом, задача автоматизации получения программ поэлементного диагностирования узлов РЭА включает выбор методов автоматизации формирования множеств P , \tilde{A} , $L1$, $L2$ сети H .

В настоящее время получение набора входных данных осуществляется следующим образом. Данные первой группы переписываются в тесторный оператор непосредственно из перечня элементов диагностируемого ЭУ. Данные второй группы получают путем присвоения КТ ОД определенных номеров. С этим этапом разработки тестовых операторов связан ряд трудоемких работ по подготовке АСД поэлементного типа к контролю ОД, обусловленный необходимостью изготовления специального сменного адаптера для диагностирования каждого нового типа ЭУ. Адаптер располагается между ОД и коммутирующим устройством АСД и включает в свой состав N_k контактных штифтов, расположенных в точках контактного поля адаптера, геометрические координаты которых совпадают с координатами КТ ОД.

Получение данных третьей группы требует глубоких знаний возможностей используемой АСД, высокой компетентности программиста и зависит от понимания программистом того, как осуществляется процесс измерений, от применяемых им эвристических методов.

Реализация в АДП режимов самонастройки и самообучения приводит к радикальному снижению трудоемкости процесса подготовки программ диагностирования ЭУ.

Укрупненный алгоритм автоматизированного процесса подготовки программы поиска производственных дефектов ЭУ в системе автоматизированного самообучающегося анализатора производственных дефектов (САПД) приведен на рис. 5.2. Решение задачи самообучения АДП требует наличия в его составе специальных средств коммутации (УКУ) и зондирования, а также разработки ряда алгоритмов идентификации номеров КТ, автоматического формирования тестов контроля топологии и параметров ЭРЭ, автоматизированной отладки тестовых программ и т. д.

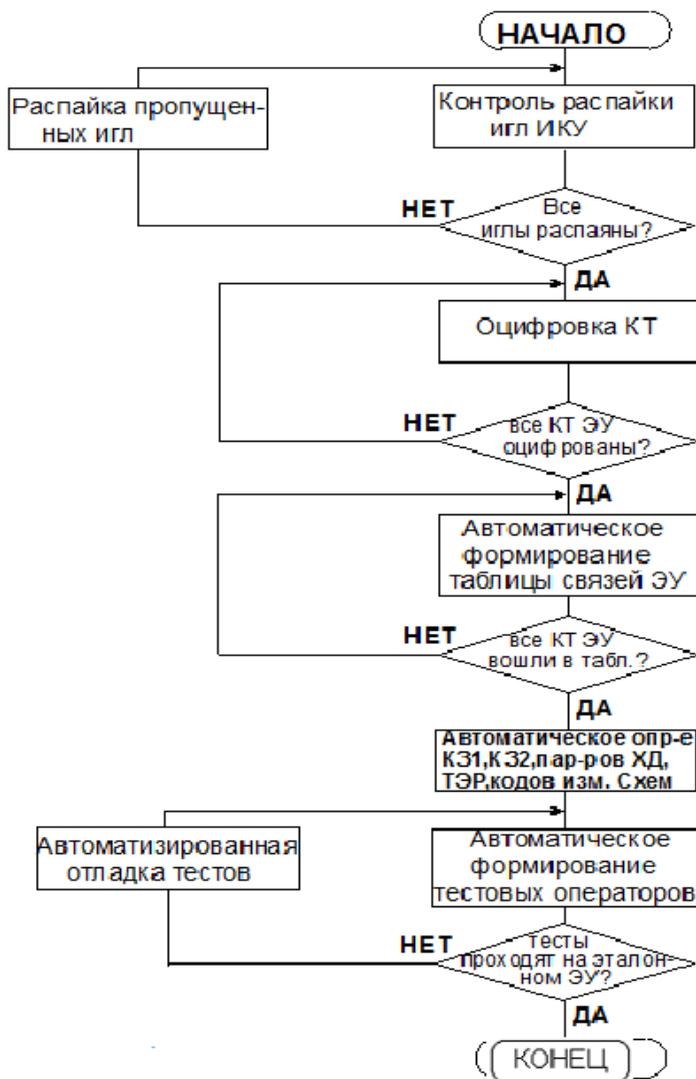


Рис. 5.2. Укрупненный алгоритм формирования программ диагностирования в режиме самообучения САПД

5.3. АДАПТАЦИЯ СИСТЕМЫ К ОБЪЕКТУ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

В случае недостатка априорной информации об ОД эта цель полностью не определена, иначе не было бы необходимости в обучении. Следовательно, к обучению АСД приходится прибегать в тех случаях, когда нет уверенности в том, что предусмотренные в АСД алгоритмы поисков дефектов, в сочетании с используемыми техническими средствами, обеспечат заданный показатель качества функционирования АСД. Обучающаяся АСД реализует принципы обучения, которые, как и в случае систем автоматического управления, заключаются в постепенном накапливании, запоминании и анализе информации о поведении ОД и осуществлении изменения алгоритма функционирования, в зависимости от приобретаемого опыта. В таких АСД качество функционирования повышается по мере их эксплуатации.

В простейшем случае в АСД выведется второй контур адаптации, который совершенствует алгоритм работы первого контура адаптации по результатам анализа его функционирования. Обучение АСД представляет собой процесс многократного воздействия на ОД и корректировку функционирования АСД в соответствии с откликами, получаемыми от объекта.

При обучении с поощрением предполагается, что в каждый момент времени желаемая реакция АСД известна и разность между желаемой и действительной реакциями используется для измерения ее свойств в нужном направлении.

При самообучении желаемая реакция обучающейся системы заранее неизвестна, и использовать ошибку обучающейся системы в явном виде для изменения ее свойств нельзя. В теории систем автоматического управления принято, что обучение без поощрения наиболее важную роль играет тогда, когда надо произвести классификацию наблюдаемых ситуаций на некоторое число областей.

Однако говорить о полном отсутствии при самообучении неправомерно, так как определенные «правила поведения» закладываются в АСД уже на этапе ее проектирования. Так, ограниченным является число и характер реализуемых АСД тестовых воздействий, исходя из некоторых ограничивается и круг реализуемых ею алгоритмов. Например, реализуемый в АСД набор тестовых воздействий позволяет осуществить распознавание присутствующих в ОД сопротивлений, емкостей, индуктивностей и р-п переходов как двухполюсных, так и многополюсных ЭРЭ. При этом имеется возможность классифицировать каждый из указанных параметров по их номинальным значениям, а так как истинные номинальные значения параметров неизвестны, выработка решающего правила и классификация параметров ЭРЭ осуществляются АСД по мере его обучения.

Реализация принципа самообучения в системах комбинированного диагностирования позволяет оптимизировать программы поиска дефектов в процессе функционирования СКД путем накопления и использования информации о стоимости и длительности отдельных проверок, вероятности выхода из строя различных ЭРЭ и вероятности соответствия определенных состояний ОД определенным дефектам.

Таким образом, УУ самообучающейся АСД обеспечивает возможность изменения существующих алгоритмов функционирования системы в достаточно широком диапазоне.

При этом УФЦ, оценивая показатели качества функционирования АСД, принимает решение о необходимости настройки параметров, адаптации или обучения системы. Возможностью воздействия на УУ обладает УОП, вызывающий перестройку алгоритмов УУ и тем самым, по мере обучения, постепенно улучшает показатели функционирования АСД.

Работа в области совершенствования АСД привела к попыткам использования в них элементов искусственного интеллекта. Это выразилось в создании экспертных систем технической диагностики ЭУ.

Экспертные системы диагностирования (ЭСД) правомерно можно отнести к классу обучающихся (самообучающихся) АСД. Они базируются на опыте и профессиональных знаниях специалистов. Совокупность неформальных эвристических приемов, интуитивных суждений, догадок и умений делать выводы формализуется в виде правил. Множество этих правил в сочетании с фактами (или утверждениями) образуют базу знаний.

Для представления знаний в ЭСД могут использоваться деревья решений, семантические сети, исчисления предикатов либо правил продукции. Эти знания не воплощены в какую-то программу, а представляют собой данные для высокоуровневого интерпретатора, а именно машины логического вывода, позволяющей выделить логическое следствие по совокупности имеющихся в системе правил.

Экспертная система диагностирования рассуждает и принимает правильные решения при сомнительных исходных данных (наиболее часто используется нечеткая логика, коэффициенты уверенности и многозначная логика); может объяснить цепочку рассуждений, приведших к тому или иному логическому выводу, понятным способом. Как правило, работа ЭСД заканчивается выдачей рекомендаций оператору, но в случае самообучающейся ЭСД результатом является оптимизация функционирования системы диагностирования. Например, база знаний самообучающейся ЭКД, ЭУ может строиться путем описания ОД на функциональном и некомпетентном уровнях и содержать описание правил порождения новых фактов или гипотез на основе вновь поступающей диагностической информации. Обнаружив неадекватные реакции ОД, ЭКД анализирует их совокупности и вырабатывает гипотезу о местонахождении дефектного элемента, в соответствии с которой осуществляется некомпетентная проверка отдельных элементов или фрагментов схемы объекта.

При неподтверждении выдвинутых гипотез ЭКД переходит к некомпетентной проверке всего ЭУ. При обнаружении дефектного элемента ЭКД осуществляет соответствующую

корректировку базы знаний, заключающуюся в пополнении базы данных и в соответствующей корректировке коэффициентов уверенности. Значения этих коэффициентов периодически приводятся в соответствие со статическими данными о местоположении дефектов, обнаруживаемых в процессе функционирования ЭКД. В случае необнаружения дефекта при некомпетентном диагностировании ЭКД переходят к исполнению тестовых функциональных подпрограмм локализации, выполняемых в интерактивном режиме с участием регулятора или оператора ЭКД. Данные об обнаруженном дефекте заносятся в память ЭКД, и в базе знаний фиксируется необходимость выполнения в определенных случаях функциональных подпрограмм локализации дефектов, минуя этап некомпетентного диагностирования.

Таким образом, адаптация алгоритмов поиска дефектов осуществляется непрерывно в процессе функционирования ЭКД и обеспечивает улучшение ее работы в результате выработки новых правил на основе получаемой диагностической информации. Если дефект не удается локализовать с точностью до элемента, оператору выдается информация о наиболее вероятных местоположениях дефекта и значениях соответствующих коэффициентов уверенности. При этом ЭКД может по запросу оператора в приемлемой для него форме пояснить цепочку рассуждений, приведенных к принятию того или иного решения.

Дальнейшее развитие экспертных систем диагностирования должно привести к появлению интеллектуальных АСД, которые будут не только вырабатывать в процессе функционирования оптимальные алгоритмы, но и выбирать стратегию обучения в соответствии с заложенной в них целевой функцией.

5.4. ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Оценка эффективности диагностирования радиоаппаратуры позволяет количественно судить о том, насколько полезным оказалось применение или внедрение системы технического диагностирования. По своему качеству, отображаемому в совокупности показателей функционального использования, СТД может быть реализована на очень высоком уровне и в этом аспекте значительно улучшать систему-аналог.

Однако в силу каких-либо причин, например высокой стоимости аппаратуры документирования информации, эффективность применения данной системы диагностирования может оказаться низкой или даже нецелесообразной. Поэтому вопросам оценки эффективности системы технического диагностирования РЭС следует уделять внимание на протяжении всего жизненного цикла объекта [1, 2].

Понятие эффективности предусматривает использование изделия по назначению, то есть для получения эффекта в результате работы системы. Эффект может быть положительным или отрицательным, но он есть всегда.

Эффективность — свойство процесса использования данной системы по назначению, в нужный момент времени с определенным результатом. Поэтому когда определяют эффективность системы, целесообразно добавить слово «использование». Эффективность использования РЭС — комплексное понятие, объединяющее понятия: качество системы, качество эксплуатации системы, эксплуатационная ситуация.

Качество системы — это совокупность свойств системы, которые обуславливают ее пригодность удовлетворять определенным потребностям в соответствии с ее назначением.

Качество эксплуатации — совокупность свойств процесса эксплуатации системы, от которых зависит соответствие этого процесса и его результатов установленным требованиям.

Эксплуатационная ситуация включает в себя такие обстоятельства, которые обуславливают влияние внешней среды, цели и режимы функционального использования системы, а также спрос на систему и результаты ее функционирования.

Эффективность и качество систем оценивается совокупностью соответствующих показателей. Показатели эффективности использования ЭРС называются количественными характеристиками степени достижения полезных результатов при использовании системы в конкретной эксплуатационной ситуации с учетом эксплуатационных затрат. Показателем качества называется количественная характеристика одного или нескольких свойств системы, которое составляет ее качество, рассматриваемая применительно к определенным условиям создания и потребления. Показатели качества систем подразделяют на интегральные, одиночные и комплексные. Интегральный показатель качества близок по своему смыслу к показателю эффективности использования системы и определяется как отношение суммарного полезного эффекта от эксплуатации системы к суммарным затратам на ее создание и эксплуатацию.

Единичными показателями качества СТД являются параметры функционального использования, технические и эксплуатационные параметры, к числу которых могут быть отнесены: достоверность информации и вероятность ошибок ДТ состояния вида (i,j) объекта, безотказность СТД (или Ср ДК), долговечность СТД и другие параметры.

Комплексный показатель качества систем характеризует совместно несколько простых свойств или одно сложное свойство системы. Примером комплексных показателей СТД может служить коэффициент $K_{ти}$ — технического использования.

В общем виде комплексные показатели технической эффективности могут быть представлены в виде произведения показателей качества K_i , то есть

$$K_I = K_1 K_2 \dots K_i \dots K_m, \quad (5.2)$$

или частного, полученного от деления одних показателей на другие:

$$K_{II} = (K_1 \dots K_m) / (K_{1+m} K_{2+m} \dots K_n). \quad (5.3)$$

При этом в качестве показателей качества могут быть использованы такие параметры, как, например, объем сигнала

$$V_c = \Delta F Q T_c,$$

где T_c — длительность сигналов; F — полоса пропускания приемника; Q — отношение сигнал/шум; добротность системы связи как произведения помехоустойчивости на коэффициент использования пропускной способности.

5.5. РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА КАЧЕСТВА И ЭФФЕКТИВНОСТИ

Эффективность операций диагностирования и контроля в можно выразить как

$$K_{\mathcal{E}}(t) = \Delta \mathcal{E} = \mathcal{E}(t/t_d) - \mathcal{E}(t); t > t_g,$$

где $\mathcal{E}(t/t_d)$ — эффективность объекта диагностирования при условии, что в момент t_g проведено его диагностирование и техническое обслуживание; $\mathcal{Y}(t)$ — эффективность ОД при условии, что техническое обслуживание не проводилось.

Нормированный показатель эффективности использования СТД

$$K_{\mathcal{E}} = [\mathcal{E}(t/t_d) - \mathcal{E}(t)]/\mathcal{E}(t), \quad (5.4)$$

$$0 < K_{\mathcal{E}} < 1.$$

При этом результат применения систем технического диагностирования можно использовать в двух вариантах:

- для изменения безотказности изделия радиоаппаратуры путем проведения работ технического обслуживания по данным диагностирования;

- для определения временного интервала τ , в течение которого радиоаппаратура сохранит свое работоспособное

состояние с заданной вероятностью РРД; в этом варианте на базе диагностирования решается задача прогнозирующего контроля (ПК), которая представляется важной для РЭС, функциональное использование которых происходит в системах, где своевременное техническое восстановление невозможно, а отказ чреват серьезными последствиями (РЭС обеспечения захода на посадку летательного аппарата, РЭС стыковки спутников на орбите и другие аналогичные задачи).

Если представить $\mathcal{E}(t) = \mathcal{E}_0(t)P(t)$, где $\mathcal{E}_0(t)$ — эффективность идеальной в смысле безотказности радиоаппаратуры, а $P(t)$ — вероятность безотказной работы, которая выступает как мера снижения эффективности, то соответственно коэффициент эффективности использования

$$K_{\mathcal{E}} = [P(t/t_d) - P(t)]/P(t), \quad (5.5)$$

то есть определяется через показатели безотказности, а сам эффект от использования СДК выражается в повышении безотказности объекта диагностики.

Имея данные об апостериорной безотказности объекта после проведения диагностирования, можно получить обобщенное выражение для коэффициента эффективности и на его основе сравнивать потенциальные возможности различных методов диагностирования. Если считать, что вероятность безотказной работы ОД в течение интервала τ при условии идеального диагностирования равна 1 и $t_g = 0$, то

$$K_{\mathcal{E}}(\tau) = [P_d(\tau) - P(\tau)]/1 - P(\tau), \quad (5.6)$$

где $P_d(\tau)$ — апостериорная безотказность за интервал времени τ .

Другим характерным показателем оценки эффективности системы технического диагностирования является коэффициент технического использования радиоаппаратуры при наличии диагностирования и отсутствии такового или повышении коэффициента $K_{\text{ти}}$ при внедрении СДД.

5.6. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ НА УНИВЕРСАЛЬНЫХ ВЕРОЯТНОСТНЫХ МОДЕЛЯХ

Выше было показано, что основной целью определения эффективности системы технического диагностирования является установление зависимостей влияния их параметров на конечный эффект функционального использования РЭС.

Большие возможности для решения данной задачи представляет моделирование системы функционального применения на базе марковских или полумарковских процессов. Пример модели приведен на рис. 5.3.

Данная модель позволяет учесть вероятность возникновения конкомитантных отказов, эффект от отказа при функциональном применении, качество диагностирования.

Допущениями в модели является то, что рассматриваются только постепенные отказы, а процессы восстановления исправного состояния рассматриваются как последовательность процессов восстановления состояния функционирования, работоспособного и, наконец, исправного состояния.

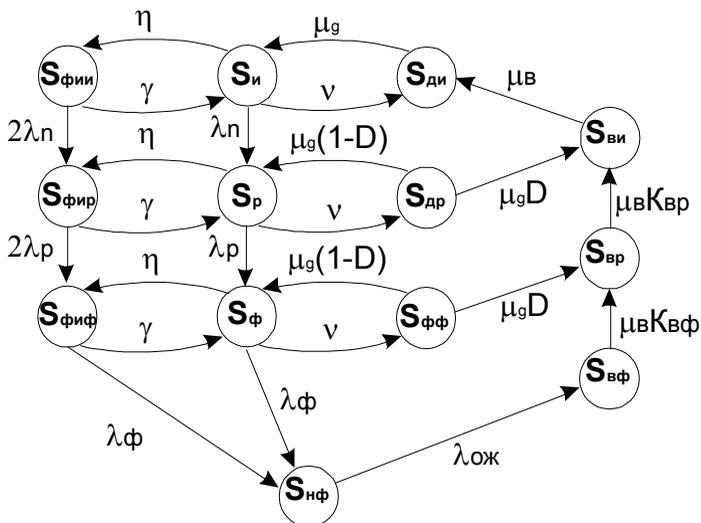


Рис. 5.3. Различные состояния, в которых может пребывать РЭС

$S_{п}$ – исправное состояние РЭС;
 $S_{р}$ – работоспособное состояние;
 $S_{ф}$ – состояние функционирования;
 $S_{вф}$ – восстанавливается функционирование;
 $S_{нф}$ – не функционирует и ждет ремонта;
 $S_{вр}$ – восстанавливается работоспособность;
 $S_{ви}$ – восстанавливается исправное состояние;
 $S_{ди}$, $S_{др}$, $S_{дрр}$ – соответственно диагностирование РЭС в исправном, работоспособном и функционирующем состояниях;

$S_{фии}$, $S_{фир}$, $S_{фиф}$ – состояния функционального использования исправного, работоспособного или функционирующего РЭС соответственно.

В этих состояниях РЭС должны приносить доход (в состоянии $S_{фиф}$ этот доход должен быть меньше, чем в других). Отказ в процессе функционального использования следует оценивать как отрицательный доход. В модели также представлены следующие параметры потоков переходов из состояния в состояние:

$\lambda_{п}$ – параметр потока возникновения неисправностей;
 $\lambda_{р}$ – параметр возникновения отказа, непрекращающегося функционирования;
 $\lambda_{ф}$ – параметр потока отказа;
 $\lambda_{ож}$ – ожидание восстановления ($\lambda_{ож} = 1/\tau_{ож}$) – среднее время ожидания;
 $\nu = 1/T_{д}$ – период диагностирования;
 $\eta = 1/T_{фи}$ – средний период функционального использования;
 $\gamma = 1/\tau_{фи}$ – среднее время функционального применения;
 $\mu_{д} = 1/\tau_{д}$ – среднее время диагностирования;
 $\mu_{в} = 1/\tau_{в}$ – среднее время восстановления;
 $D_{д} = 1 - P_{1,2} - P_{2,1}$ – вероятность правильного диагностирования ($P_{1,2}$ и $P_{2,1}$ – вероятности ошибок диагностирования);
 $P_{ко}$ – вероятность возникновения конкомитантных отказов;

$K_{вр}$ – коэффициент качества восстановления работоспособного состояния – количественно характеризует качество восстановления работоспособности изделия.

6. АВТОМАТИЗАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ

6.1. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ИСПЫТАНИЯ И КОНТРОЛЯ РЭА

Постоянное повышение функциональной сложности и интеграции, увеличение надёжности элементов, внедрение новых способов обработки и передачи данных привели к тому, что изменились как испытания радиоаппаратуры, так и сами приборы, предназначенные для проведения этих испытаний.

Одновременно повысились требования к радиоэлектронным устройствам по стойкости к воздействию внешних факторов, надёжности, долговечности, что, в свою очередь, привело к значительному увеличению объёма исследований и, как следствие, увеличило трудоёмкость этих испытаний и контроля изучаемых устройств.

Также стало меняться отношение между контрольно-измерительными и исследовательскими действиями. В прошлом они относились друг другу как 1:5, но теперь время, необходимое для измерений, превосходит в разы время для проведения исследований.

На сегодняшний день трудоёмкость контрольно-испытательных действий образует от 40 до 50 % от общей трудоёмкости, затрачиваемой на изготовление радиоаппаратуры. Например, на часть приемосдаточных периодических исследований, а также на диагностику, на долговечность относится около 10 % затрачиваемой трудоёмкости. Можно заметить, что количество исследований на надёжность за последние пять лет выросло в среднем в 2 раза.

В связи с этим автоматизация контрольно-испытательных исследований оказывается на сегодняшний день одним из наиболее развивающихся направлений для увеличения качества и надёжности радиоаппаратуры.

До сих пор заводы оснащались испытательным оборудованием общего типа, позволяли производить моделирование всех типов единичных внешних воздействий, например, имитировать различную температуру, влажность, вибрацию, ударные нагрузки и т.п. Большую трудоёмкость контрольно-испытательных исследований можно объяснить тем, что исполнение исследований на таких установках требует значительных расходов на подготовку, а именно подгонка устройств для крепления, монтажа и установки приборов и т.п.

Соотношение времени на подготовительные операции и времени, которое затрачено на испытания, позволяет рассчитать реальную производительность оборудования. Данная величина называется коэффициентом эффективности испытаний:

$$K_{\text{ЭФ}} = t_{\text{И}} / t_{\text{ПЗ}}, \quad (6.1)$$

где $t_{\text{И}}$ — «чистое» время испытаний без учета времени выхода на рабочий режим; $t_{\text{ПЗ}}$ — время на подготовительные операции.

Для более 70 % разновидностей периодических исследований данный коэффициент находится в значениях 0,125-0,88.

Производство новейших универсальных установок, которые позволяют воспроизводить исследования разных типов и в произвольной последовательности, повышает производительность, а также информативность уровня автоматизации исследований (АИ).

Увеличить информативность можно с помощью увеличения исследовательских данных, которые получают в единицу времени. Регистрация полученных с устройств данных происходит при комбинированном воздействии внешних сил. Способ управления этими устройствами очень сложен, что сильно влияет на наличие автоматизации управления последовательности исследований.

Структура АИ в ходе своего развития претерпела несколько стадий, которые можно сгруппировать по следующим признакам.

К начальной категории можно отнести функции, которые связаны с измерением численных данных исследовательского режима, а также управлением режимами исследований.

Ко второй категории относятся функции для измерения значений самого изделия.

Третья категория помогает со сбором и обработкой полученных данных.

К четвертой группе можно отнести оставшиеся части вспомогательных операций, например, проверку по аттестации устройств, аккредитации достоверности полученных данных исследований и т.п.

На первой стадии АИ были преодолены проблемы автоматического управления исследовательскими устройствами камерами температуры, виброустановками и барокамерами. Это позволило обеспечить реализацию характеристик исследовательского режима в допустимых пределах, которые указываются в инструкциях на исследование или же в ТУ на изучаемый прибор.

При этом показания приборов, которые характеризуют режим испытаний, выводятся на небольшой пульт управления. При отклонении параметров от установленных пределов подавался световой или же звуковой сигнал. Таким образом, автоматизировалась первая группа операций.

Система автоматизированного управления (САУ), с кибернетической точки зрения, представляет собой непрерывную замкнутую систему автоматической стабилизации или же программного управления.

Примером САУ, которая служит для поддержания значений регулируемых величин, может быть система стабилизации температуры ТВК-1 с использованием в качестве датчиков контактных ртутных термометров.

В системах программного управления (СПУ), которые задают воздействие, изменяется по определенным законам, что

представляется в виде функций времени. Примером такой системы может служить автоматическая система пуска, подготовки к работе и включения вакуумной испытательной установки.

Схема испытания радиоаппаратуры в замкнутой САУ представлена на рис. 6.1.



Рис. 6.1. САУ: T_k – параметр камеры; T_3 – заданные значения параметра камеры; \hat{T}_k – оценка параметра канала

$$\Delta T = \hat{T}_k - T_3;$$

$$\Delta U = f(\Delta T).$$

В задачи САУ входит следующее: включение и отключение отдельных наносов по мере получения определенного давления, открывание и закрывание вентилей и клапанов и т.п. Включение-выключение таких установок требует определенной последовательности действий, которые зависят от таких параметров, как скорость остывания нагретых или же, наоборот, нагрева охлажденных элементов. Например, подача охладителя не прекращается до тех пор, пока не остынет масло в насосе, а охлаждающую жидкость нельзя удалить из криогенной ловушки до закрытия крана.

На второй стадии развития, благодаря автоматизации, появилась возможность проводить обработку результатов испытаний. Для этой цели использовались ЭВМ.

На третьей стадии автоматизации подверглись операции измерения электрических параметров испытываемой аппаратуры. Это было обусловлено, так как возросло число задаваемых и измеряемых параметров. Появились установки полуавтоматического тестового контроля, которые функционировали по жесткому алгоритму. Таким образом, была преодолена проблема автоматизации второй группы операций.

Появление компьютеров, а также развитие более точной техники открывает широкие возможности для автоматизации всех групп операций испытаний, а также создание комплексной высокоэффективной автоматизированной системы испытаний и контроля (АСИК) радиоаппаратуры.

Под автоматизированной системой испытаний и контроля будем понимать программно-аппаратный комплекс на базе средств испытательной, измерительной и вычислительной техники, который предназначен для выполнения комплексного контроля изделий. Автоматизированная система контроля предназначена для обеспечения эффективного функционирования испытательного оборудования путем автоматизированного выполнения управляющих функций испытаний. В такой системе осуществляются регистрация, сбор, переработка и анализ информации, которая необходима для реализации управляющих функций, а также информации, которая характеризует работоспособность испытываемой радиоаппаратуры в различных условиях.

Комплексная автоматизированная система испытаний помимо повышения производительности, позволяет также высвободить некоторое количество обслуживаемого персонала. Это позволяет оперативно получать и представлять информацию о качестве изделий, а также повышать надежность и достоверность результатов. Создание такой системы позволяет не только сократить трудоемкость на испытания радиоаппаратуры, но и повысить точность исследуемых данных.

АИ дает следующие возможности:

- повысить эффективность разработок объектов испытаний и при этом уменьшить затраты на их разработку;

- получить качественно новые результаты, достижение которых невозможно без использования автоматизированной системы контроля;

- сократить сроки испытаний образцов новой техники;

- получать более оперативную информацию об этапах обработки, качестве и надежности радиоаппаратуры.

Функции управления, информации и вспомогательные задачи автоматизированной системы испытаний обеспечивают выполнение комплекса задач или же отдельных задач, которые направлены на достижение определенных целей. Автоматизация функций при создании такой системы определяется возможностью формального процесса управления испытаниями, а также производственной необходимостью и должна быть экономически обоснована.

Функция управления автоматизированной системы испытаний состоит из совокупности действий, которые включают в себя получение информации о состоянии испытываемого объекта и системы, оценку информации, выбор управляющих воздействий и их реализацию.

Функция информации необходима для получения, обработки и передачи информации о состоянии испытываемого объекта, внешней или же внутренней среды испытательной камеры.

Функция вспомогательных задач необходима для сбора и обработки информации о состоянии технического или программного обеспечения и после этого представляет эту информацию оператору или осуществляет функцию управления на соответствующие компоненты.

Перечисленные функции автоматизированной системы испытаний могут выполняться как на протяжении всего функционирования системы, так и по запросу или другому регламенту.

На рис. 6.2 показана АСИ и управления испытательными режимами на базе машин централизованного контроля и управления (МЦКУ). Объектом управления может быть любая из испытательных установок, в которой требуется

поддерживать определенный режим. Выходной параметр объекта управления воспринимается датчиком и преобразуется в электрический сигнал. Любая климатическая установка имеет собственный датчик АСУ, пульт управления, а также прибор для контроля. Для связи объекта регулирования с машиной централизованного контроля и управления необходимо устройство датчика Д2 и преобразователь сигналов в 0-5 мА или 0-10 В постоянного тока. Применение отдельного датчика для связи с компьютером позволило сделать данный канал связи независимым, а также увеличить надежность системы.

Преобразованный сигнал, который поступил в канал ЭВМ, позже попадает в отделы сравнения и измерения. В блоке сравнения происходит сопоставление с сигналом, который поступил с поля для набора установок. Поле для набора дублирует режим, который выставлен на пульте управления. Блок сравнения подает сигналы для запоминающего устройства регулирования отклонений (УРО) и устройства управления регистрацией отклонений (УУРО) от заданного режима. Сигнал с УРО используется как резервный, который дублирует АСУ. Сигнал с запоминающего УО используется для аварийного отключения установки, в случае если параметр выедет за установленные пределы, одновременно с этим будет активирована сигнализация на световом табло. УУРО подает сигнал на автоматический регистратор, который фиксирует время нарушения режима и номер контрольной точки, где произошло нарушение.

Тракт измерения состоит из блока измерений, где входящий сигнал преобразуется в цифровую информацию, которая поступает на блок периодической регистрации, а далее идет на автоматический регистратор. Информация о любом параметре предоставляется по требованию человека с помощью блока вызова. Для дальнейшей обработки на компьютере данные могут быть выведены с помощью устройства связи с вычислительной машины.

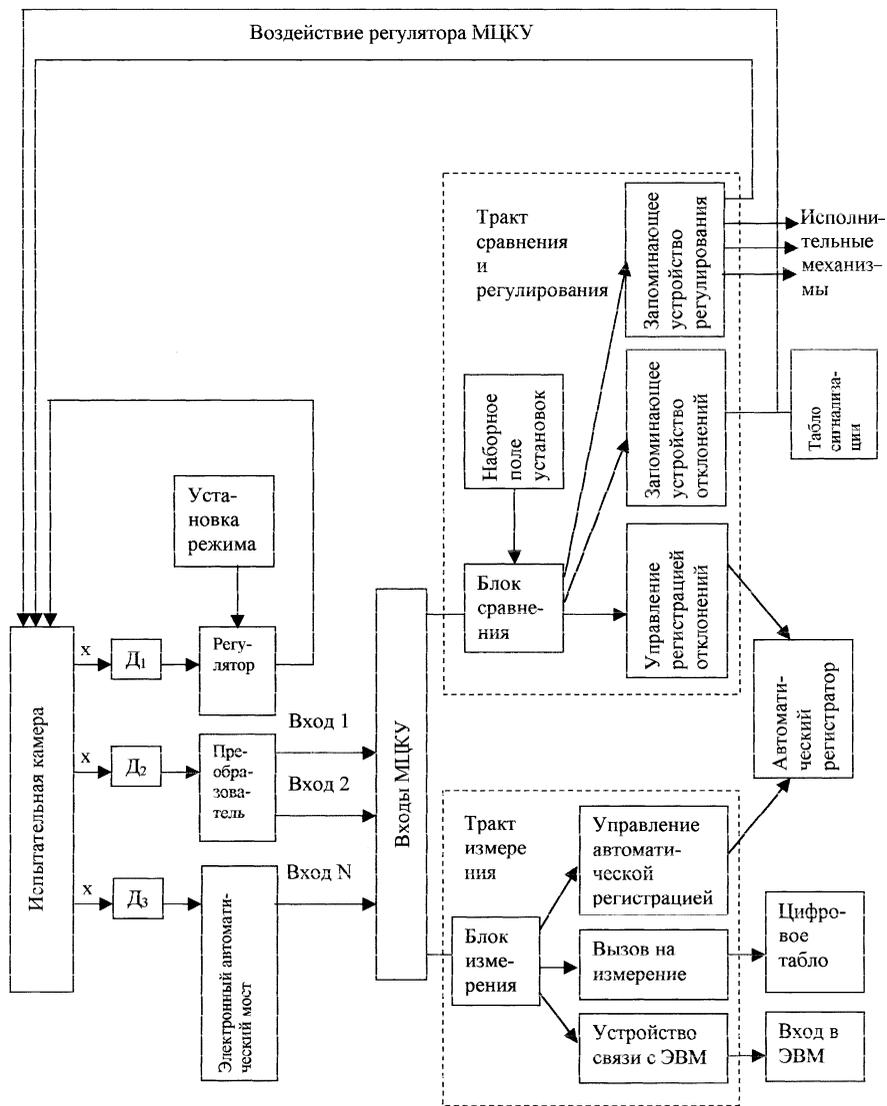


Рис. 6.2. Структурная схема АСИ на базе машины ЦКУ

АСУ, которая рассматривается выше, позволяет решать задачи управления испытаниями и обрабатывать анализы испытаний, может быть представлена и другой моделью (рис. 6.3).

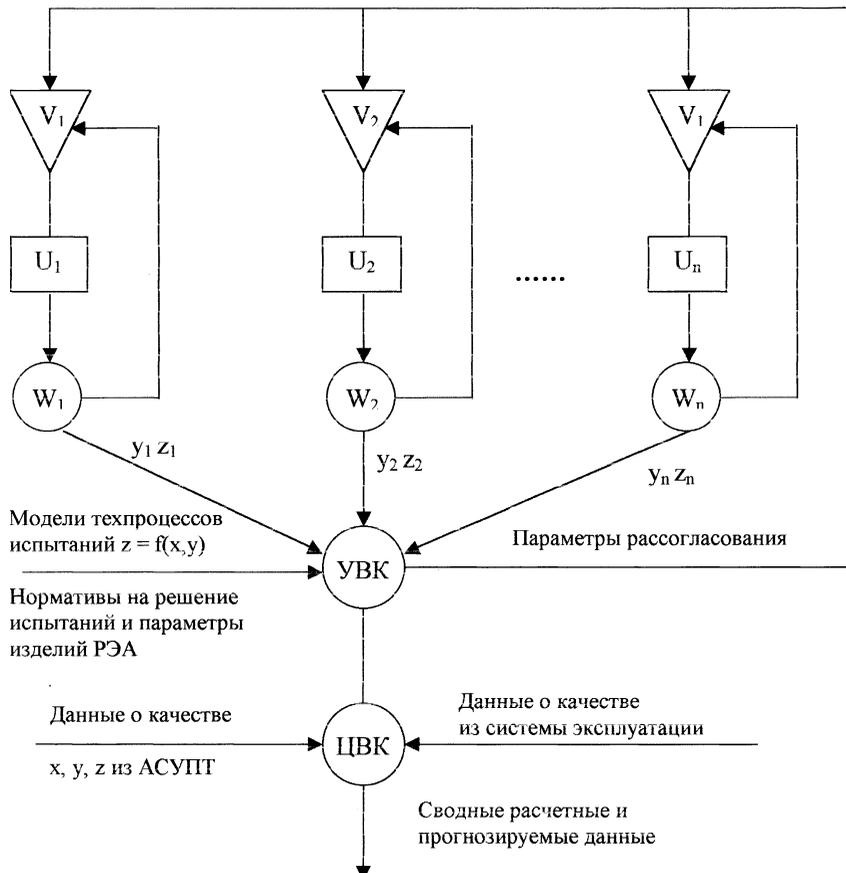


Рис. 6.3. Модель АСИ

Здесь U_1, U_2, \dots, U_n — рабочие места испытаний, которые оснащены спецоборудованием, а также средствами контроля и измерений W_1, W_2, \dots, W_n , фиксирующими режимами испытаний Z_j и параметры испытываемых изделий y_{kj} . Управление режимами контроля параметров радиоаппаратуры может

осуществляться как автоматически, так и централизованно с помощью компьютера и исполнительных устройств V_1, V_2, \dots, V_n .

Являясь составной частью СУ качеством продукции (СУК), система испытаний, так же как и АСУ технологическим процессом (АСУТП) и САУ, может рассматриваться как подсистема, которая выполняет функцию информации с помощью взаимодействия АСУК с АСУТП, то есть предоставляет обеспечение объективной и достоверной информацией о состоянии изготавливаемых деталей (рис. 6.4).

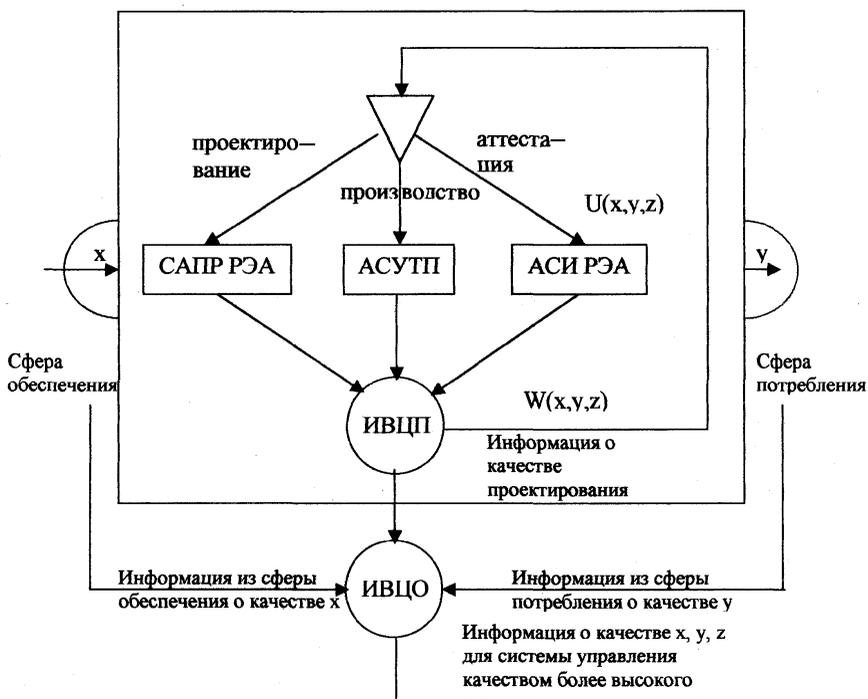


Рис. 6.4. Общая схема управления качеством радиоаппаратурой: ИВЦП – информационно-вычислительный центр предприятия; ИВЦО – информационно-вычислительный центр объединения

Указанные выше недостатки препятствовали включению системы испытаний в состав децентрализованных иерархических систем (ДИС). При такой организации каждое устройство управления решает определенные задачи. Данное распределение обеспечивает более полную и равномерную нагрузку объектов различных уровней иерархии, что, в свою очередь, повышает производительность, надежность системы, снижает стоимость обслуживания. Структурные схемы одноуровневой и многоуровневой (иерархической) СУИ с использованием вычислительных машин приведены на рис. 6.5.

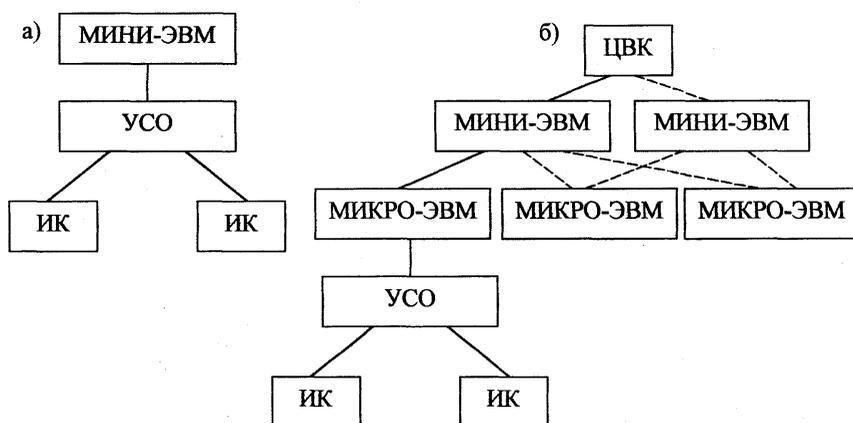


Рис. 6.5. Структурные схемы СУИ: а – одноуровневая; б – иерархическая (ИК – испытательная камера; ИИ – испытываемое изделие; УСО – устройство связи ЭВМ с объектом)

Применительно к автоматизированной системе испытаний, которая также имеет сложную иерархическую структуру, функции системы должны быть разделены между разными уровнями следующим образом. Программное устройство более высокого уровня обеспечивает: хранение и подготовку программ для контроля и испытаний изделий; планирование испытаний; выбор контрольно-измерительной и испытательной

аппаратуры; накопление и статистическую обработку результатов контроля и испытаний; подготовку обмена и сам обмен информацией с вышестоящим уровнем систем управления качеством и т. д.

Микро-ЭВМ выполняют функции для организации загрузки и выполнения программы единичного испытания и контроля изделия; приема, а также предварительной обработки и подготовки к передаче результатов анализов; контроля и диагностики испытательной и контрольно-измерительной аппаратуры.

Для иллюстрации описанного выше будет рассмотрена структура автоматизированного участка, который предназначен для комплексных механических испытаний. Оперативное проведение данных исследований обеспечивается участками, которые включают в себя полный набор механических стэндов, с широким применением средств автоматизации на базе различных вычислительных машин, которые, в свою очередь, объединены в АСИ с двухуровневой структурой управления.

Структура такого участка показана на рис. 6.6. Автоматизированный тестер на базе мини-ЭВМ используется для контроля функционирования испытываемых узлов до начала, после и в процессе испытаний.

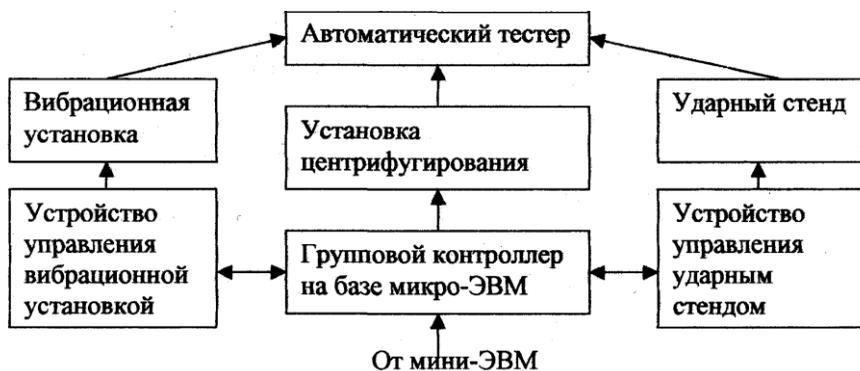


Рис. 6.6. Автоматизированный участок механических испытаний

Непосредственное управление испытательными установками происходит с помощью микроконтроллера. Кроме того, он содержит специальные программы, которые служат для обнаружения и локализации неисправностей. Микроконтроллер на базе микрокомпьютера использует программы для управления координирующей мини-ЭВМ и передает в нее информацию о нарушениях режима работы.

Групповой контроллер объединяет все устройства в единый участок и выполняет такие операции как: самопроверку, проверку готовности испытательных установок к работе, контроль за работой установок в процессе проведения исследований, измерения и обработку результатов исследований, выдачу протокола о результатах исследований.

Возможности современных ЭВМ позволяют автоматизировать и объединить в сеть более высокие иерархические уровни организации службы испытаний, а именно испытательный центр и испытательную станцию.

Испытания изделий и материалов радиоаппаратуры в естественных условиях имеют важное значение, так как позволяют получить наиболее полные данные о качестве и надежности объектов исследования в реальных условиях эксплуатации. Для проведения исследований в естественных условиях создаются спецстанции, располагающиеся вблизи интересующих климатических зон. На рис. 6.7 показана структура такого центра испытаний.

В отличие от испытательных станций все влияющие факторы воссоздаются в лабораторных условиях.

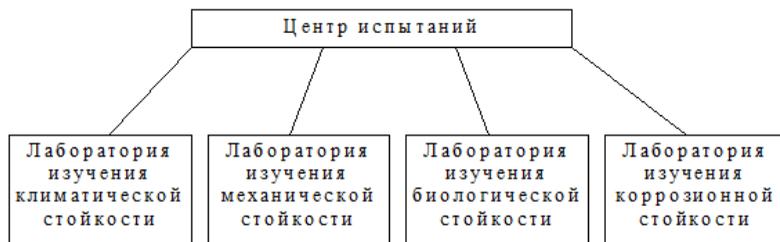


Рис. 6.7. Структура испытательного центра

Основные задачи, решаемые на испытательных центрах:

- представление предприятиям технической исследовательской базы, которая позволяет проводить испытания изделий, которые, в свою очередь, наиболее полно удовлетворяют всё более ужесточающимся требованиям, предъявляемым заказчиком;

- проведение граничных и матричных исследований, которые направлены на выявление конструктивно-технологических изъянов изделий, и разработка на их основе руководящих материалов по совершенствованию конструкций радиоаппаратуры;

- накопление, обобщение и анализ результатов исследований для реализации мероприятий для увеличения стойкости изделий и совершенствования систем контроля и методов исследований;

- внесение рекомендаций и предложений по модернизации существующего и созданию нового контрольного оборудования.

6.2. ТРЕБОВАНИЯ К ОБЕСПЕЧЕНИЮ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ

АСК состоит из звеньев, которые объединены общей целевой функцией и обеспечивают ее функционирование. Каждое звено системы контроля, которое выполняет в системе определенную функцию, представляет из себя элемент обеспечения.

Любой иерархический уровень системы контроля обладает структурой обеспечения, которая, в свою очередь, состоит из следующих видов: технического, математического, программного, информационного, лингвистического, организационного, методического и метрологического.

Следует отметить, что для эффективного функционирования системы контроля необходима совокупность перечисленных выше элементов, а также совместные усилия разработчиков системы и радиоаппаратуры. Отметим, что стоимость

приборов для контроля и испытаний составляет сравнительно небольшую часть стоимости от всей системы. Больше всего затрат выходит на средства программно-математического обеспечения.

Техническое обеспечение — это совокупность взаимодействующих и объединенных в единую систему приборов: получения, ввода, подготовки, обработки, хранения и т.п.

Математическое обеспечение — это методы, математические модели системы и исследуемых изделий, алгоритмы функционирования системы контроля.

Программное обеспечение — это программы, которые необходимы для реализации всех функций системы контроля.

Информационное обеспечение — нормативно-справочная документация, которая может содержать описание стандартных контрольно-испытательных процедур, типовых управляющих решений и т.п.

В состав лингвистического обеспечения системы испытаний входят языки описания и манипулирования данными, управления процессами контроля и программирования.

Организационное обеспечение — совокупность правил и предписаний, которые устанавливают структуру организации, а также ее предписаний, их функции и требуемое взаимодействие персонала с комплексом техсредств и между собой.

Методическое обеспечение — это документы, содержащие состав, правила отбора и эксплуатации компонентов системы контроля, последовательности операций, которые реализуют типовые процедуры контроля, инструкции по работе с оборудованием.

Метрологическое обеспечение системы контроля состоит из метрологических средств и инструкций по их применению.

Наиболее важным параметром, который характеризует эффективность системы, является достоверность — это качественная оценка объективного свойства системы контроля распознавать вид технического состояния объекта. Оценка достоверности системы можно оценить только приблизительно, так как ее расчет затруднителен. В связи с этим обычно проводят экспериментальную оценку достоверности.

Выдача информации определенного вида контрольно-измерительной подсистемой зависит от таких факторов, как: помехи и сбои в звеньях, состояния сигналов, полноты охвата исследуемого устройства и т. д.

Влияние регулятора режимов контрольного оборудования на достоверность получаемых данных в основном сводится к специфике обнаружения отказов, которые чувствительны к определенным внешним воздействиям. Они проводятся по единичной программе с неизменными условиями, которые, в свою очередь, отличаются от реальных условий эксплуатации.

6.3. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

АСК радиоаппаратуры строятся на базе современных интегральных вычислительных средств, благодаря которым обеспечиваются быстродействие и достоверность получаемых данных.

Поскольку состав ТС систем контроля в какой-то мере определяет и другие компоненты системы, то вначале рассмотрим ТС. Они должны содержать: вычислительные машины (формата микро); средства хранения информации, устройства ввода-вывода; устройства для оперативного взаимодействия; интерфейс; аналого-цифровые преобразователи и т.п.

Функционально-заключительные элементы системы, которые имеют одинаковый интерфейс ввода-вывода, называются модулями. При наличии таких модулей разного назначения система контроля может быть составлена из них полностью или же частично. Все модули можно разделить по выполняемым функциям: управляющие, интерфейсные и обрабатывающие.

Многопроцессорная структура системы контроля используется для реализации функции управления контрольно-исследовательским оборудованием и функции обработки данных.

Требования к техническому обеспечению системы контроля сводятся к следующим:

- комплекс ТС системы должен быть достаточным для реализации всех функций, которые установлены в ТЗ на систему;

- в комплекс технического обеспечения системы должны входить аппаратные средства, которые необходимы для наладки и проверки работоспособности ТС;

- ТС системы контроля должны иметь срок службы не меньше 6 лет, а их характеристики должны обеспечивать взаимозаменяемость одних средств на другие без изменений и регулировки параметров;

- структура и характеристики ТС системы должны обеспечивать возможность модернизации;

- техническое обеспечение системы контроля должно быть надежным и устойчивым к внешним воздействиям, к нестабильностям источников питания и при этом создавать минимальный уровень помех.

Средства всех ТС системы контроля можно разделить на пять групп по выполняемым функциям:

- средства воспроизведения внешних взаимодействующих факторов;

- контрольно-измерительные средства;

- средства управления, обработки и преобразования данных;

- средства оперативного взаимодействия человека с АСК;

- средства ввода-вывода информации на внешние носители.

Автоматизация производится как на базе встроенных в исследовательское оборудование микропроцессорных средств вычислительной техники (МСВТ), так и с использованием компьютеров различного класса. Развитие автоматического исследовательского оборудования тесно связано с включением в их состав микропроцессорных средств, при этом контрольно-исследовательское оборудование создается с применением:

- спецприборов и распределенных вычислителей (РВ);
- распределенных приборов и центрального вычислителя (ЦВ);
- универсальных приборов и РВ.

Спецоборудование разрабатывается под конкретные виды изделий. Оно включает в свой состав программируемые источники питания и входные генераторы, устройства крепления и коммутации изделий и т.п. Такое оборудование имеет развитый уровень автоматизации и может работать как автономно, так и в составе системы контроля. Основные преимущества спецоборудования: высокая эффективность, повышение производительности труда в 3-4 раза; снижение материалоемкости в 7-8 раз и т.п. Именно специализация повышает уровень автоматизации. На основе спецоборудования, используя принципы иерархического управления, предприятие формирует базовые исследовательские участки и высокоавтоматизированные типовые контрольно-исследовательские лаборатории.

Однако увеличение документации на изделие вызывает, в свою очередь, увеличение объема работ по созданию спецоборудования. Избежать таких трудностей позволяет применение модульно-агрегатированного принципа.

Более перспективным является направление, которое связано с созданием универсального оборудования и распределением вычислительных средств. Одной из основных задач применения микропроцессорных средств вычислительной техники является создание средств сопряжения устройств и обеспечение совместимости программных средств различных моделей компьютеров.

Анализ требований к новому поколению контрольно-исследовательского оборудования для систем контроля с распределенными вычислениями позволяет выделить необходимые функциональные блоки встраиваемых микропроцессорных средств вычислительной техники (рис. 6.8).

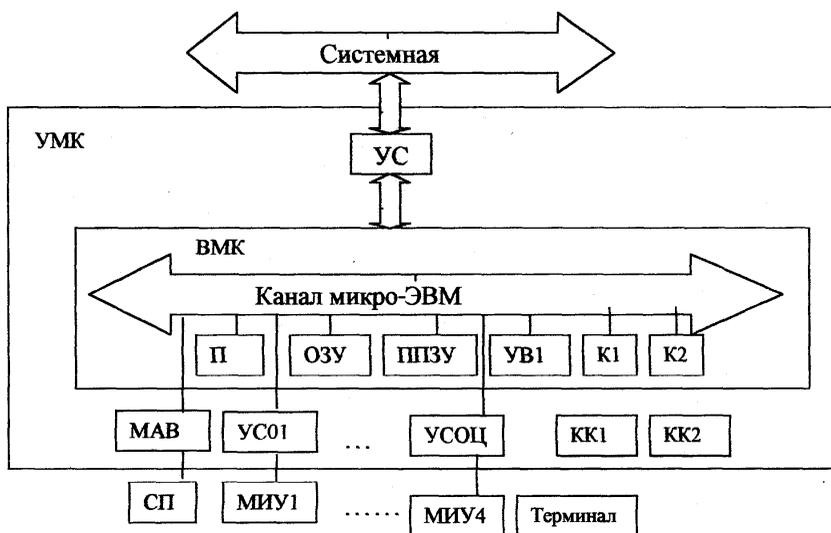


Рис. 6.8. Схема встраиваемого МСВТ

УС — устройство сопряжения; УСО — устройство связи с модулями; ВМК — встраиваемый микроконтроллер; УМК — управляющий микропроцессорный комплекс; ОЗУ — оперативно запоминающее устройство; ППЗУ — программно постоянно запоминающее устройство; МИУ-1 — модуль испытательных установок; УУ — устройство управления; К1 — согласующие устройства; КК1 — дополнительный каркас; СП — специализированный пульт; УСО — устройство сопряжения; МАВ — модуль аналогового ввода.

Анализируя выше показанную схему встраиваемого прибора в исследовательское оборудование, можно выделить необходимые функциональные блоки автоматизации. К ним относятся: УС микро-ЭВМ с системной магистралью, УСО исследовательских установок, МАВ, а также различные дополнительные устройства управления. Специальный ВМК с устройствами сопряжения представляет собой УМК, который решает задачи исследовательского уровня в исследуемом оборудовании.

Встраиваемый управляющий микропроцессорный комплекс может быть создан на базе микрокомпьютера, который является основой встраиваемого микроконтроллера, в который входят ОЗУ, перепрограммируемое постоянное запоминающее устройство (ППЗУ), согласующие устройства К1 и К2 для сопряжения дополнительных, которые обеспечивают подключение дополнительных модулей к встраиваемому микроконтроллеру. Для отладки аппаратного и программного обеспечения встраиваемого микроконтроллера, организации автономного функционирования АСУ предусматривается дополнительное подключение УУ для терминала. Для подключения к встраиваемому микроконтроллеру МИУ1-МИУ4 используется УС1-УС04; подключение СП установки осуществляется МАВ; системная магистраль сопрягается с каналом микро-ЭВМ через устройство сопряжения. Подключение специализированного пульта оператора установки осуществляется МАВ. За счет этого исследовательская установка может работать автономно.

Связь устройств ПУ с установками контроля и измерений происходит с помощью интерфейсов, то есть согласующей части, которая расположена между устройствами системы или частями одного устройства, где происходит обмен информацией.

В системах контроля и исследований радиоаппаратуры применяются как стандартные, так и специнтерфейсы. Наибольшее распространение получил интерфейс для измерительных систем. Стандарт на приборный интерфейс устанавливает основные требования к обмену цифровой информацией. Соединение устройств между собой, согласно одному стандарту, должно осуществляться через многопроводной магистральный канал общего использования. Изображенная на рис. 6.9 схема канала включает в себя 3 шины: информационную, синхронизации и управления. Число устройств, которые подсоединены к каналу, — не более 15, максимальная скорость передачи — 1 Мбайт/с. Логические уровни сигналов выбраны из расчета применения интегральных ТТЛ-схем.

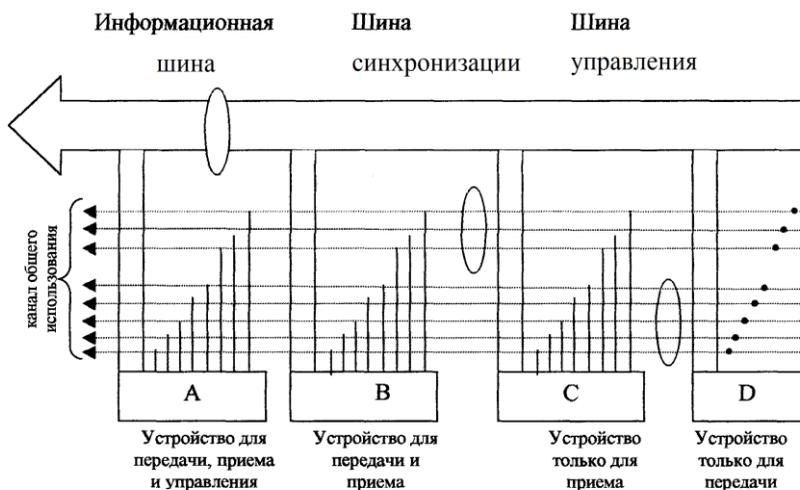


Рис. 6.9. Схема канала общего использования приборного интерфейса

Цикл передачи информации состоит из четырех фаз: устройство-источник (УИ), который выставляет информационный байт, а также сигналы на шине синхронизации; устройство-приемник (УП), который принимает информацию и подготавливается к приему нового байта информации; шина управления, используемая контроллером, встраиваемым в компьютер или другое вычислительное устройство; шина синхронизации из трёх линий, служащая для согласования готовности устройств к передаче и приему информации.

На рис. 6.10 показана схема АУ камерой для исследований на воздействие сухого тепла с обработкой данных на микрокомпьютере и регистрацией режима камеры на графопостроителе.

Пользователей современных вычислительных машин, которые работают в составе автоматизированной системы контроля, интересуют такие характеристики, как производительность, форма и режимы общения с компьютером, возможность работы с базой данных и языки программирования.

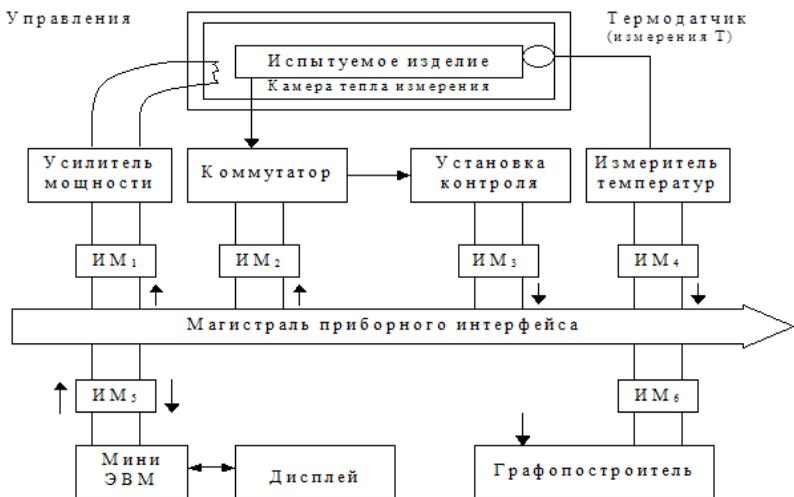


Рис. 6.10. Схема автоматизации проведения исследований в камере тепла

Иерархическая структура системы контроля и режим взаимодействия встраиваемых микропроцессорных средств вычислительной техники или микро-ЭВМ с мини-ЭВМ более высокого уровня иерархии автоматизированной системы контроля, а мини-ЭВМ с центральным вычислительным комплексом (ЦВК). АСУ качеством позволяет более эффективно использовать аппаратно-программные средства автоматизированной системы контроля, а также расширить круг решаемых задач.

ЦВК должен обладать высоким быстродействием и большим объемом оперативной памяти. С помощью УС по машинным или телефонно-телеграфным каналам он соединяется с периферийной миникомпьютерами автоматизированной системы контроля.

Все части вычислительной системы могут быть присоединены к одной общей многопроводной шине обмена, при этом захватывая ее на короткое время для обмена информацией.

Арбитр шины (рис. 6.11) предугадывает возникновение конфликтных ситуаций при использовании шины, разрешая обмен только между двумя устройствами в соответствии с их приоритетами.

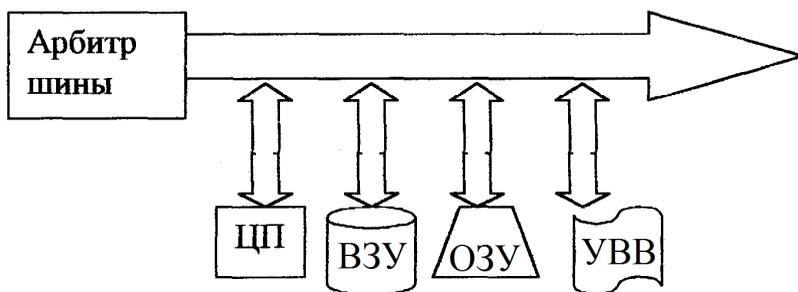


Рис. 6.11. Магистрально-модульный принцип построения миникомпьютера: ЦП — центральный процессор; ВЗУ — внешние запоминающие устройства; ОЗУ — оперативное запоминающее устройство; УВВ — устройства ввода-вывода

Для автоматического контроля и изменения параметров радиоаппаратуры применяются различные устройства.

Увеличение степени интеграции УПЭ привело к необходимости разработки более совершенных устройств, в состав которых входит и миникомпьютер.

Главная трудность при создании контрольно-измерительных приборов для аналоговой радиоаппаратуры состоит в разработке высокочастотных средств измерения и контроля. Указанные трудности определяют ведущее место в них средств формирования входного воздействия и измерения параметров входных и выходных сигналов, поскольку процедуры контроля сравнительно просты.

При контроле цифровой радиоаппаратуры встречаются другие сложности, хотя и не требуются прецизионные средства измерения и контроля, но сложность и большой объем шестовых последовательностей обуславливают применение вычислительных средств.

Основными блоками установок контроля, которые требуют к себе повышенного внимания, являются:

- коммутирующая матрица;
- контактирующее устройство;
- устройства задания входных воздействий и измерения параметров;
- управляющие источники.

В практике управления испытательными режимами первичными источниками сигналов являются датчики или измерительные преобразователи. В АКИ передача и обработка информации происходят в дискретном виде. Поэтому требуется преобразовать электрический сигнал от датчика из аналоговой в цифровую форму. Для исполнительных устройств, задающих режим в испытательной камере, как правило, выполняется обратное преобразование — из цифровой в аналоговую форму. Эти преобразования выполняются аналого-цифровыми и цифроаналоговыми высокоточными преобразователями.

6.4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Математические модели, критерии, алгоритмы и методы управления испытаниями и контрольно-измерительной аппаратурой составляют основу математического обеспечения автоматизированной системы контроля, без которого невозможна формализация процессов, протекающих в системе.

Математическое обеспечение используют разработчики при создании различных систем контроля. В процессе функционирования автоматизированной системы математического обеспечения реализуется в программном обеспечении.

Рассмотрим сначала математическую модель автоматизированного технологического процесса исследований (АТПИ). Она определяет последовательность операций и взаимодействие технических средств при решении задач подготовки исследований радиоаппаратуры и стендов контроля, управления исследовательскими стендами и т. д. (рис. 6.12).

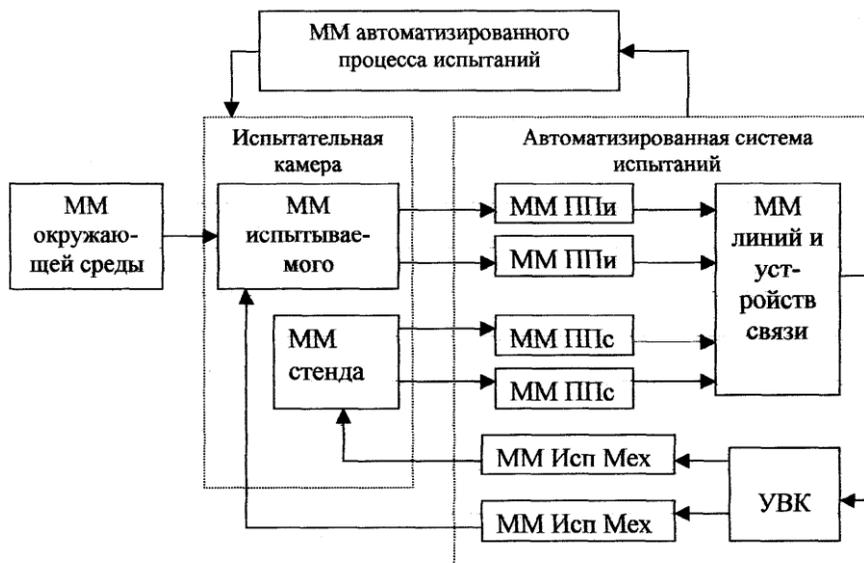


Рис. 6.12. Математическая модель технического процесса:
 ММ — математическая модель; ППи — первичный преобразователь параметров изделия; ППс — первичный преобразователь параметров станда; Исп Мех — исполнительные механизмы;
 УВК — управляющий вычислительный комплекс

В общем случае разработка математической модели технического процесса исследований, которая достоверно описывает реальный процесс, затруднена из-за наличия большого количества внешних и внутренних факторов.

Точность модели зависит от объема и тщательности обследования объектов и процессов, от описания их взаимодействия. Использование более точной и сложной модели не всегда оправдано, так как может привести к материальным и временным потерям.

Математическая модель процесса исследований формируется на основе следующих типов зависимостей: графа иерархической структуры, который отражает связь между подразделениями или операциями технического процесса исследований; уравнений, которые описывают операции процесса исследо-

ваний и функционирование подразделений, формирующих граф структуры; ограничений на переменные и параметры; целевых функций, которые связывают критерий оптимальности с переменными системами.

Для формирования автоматизированной системы контроля представим ее в виде, показанном на рис. 6.13. Иерархическая структура системы включает в себя подсистемы на уровне исполнителя W , на уровне участка W_{6j}^{5n} , на уровне отдела испытаний W_{5j}^{4n} , на уровне организации W_{4j}^{3n} . По мере возрастания ранга подсистемы $U(x, y, z)$, $W(x, y, z)$ и $V(x, y, z)$ усложняются. Для точной формулировки целевой функции на каждом уровне приходится подниматься на более высокий уровень и вводить критерии глобального масштаба.

Блок $U(x, y, z)$ (рис. 6.3 и 6.4) является основой. Именно он выполняет испытания, преобразуя вход x в выход y в соответствии с командами, поступающими из блока $V(x, y, z)$. Блок $V(x, y, z)$ на основании информации от информационно-измерительной и контролирующей частей $W(x, y, z)$ и от управляющей подсистемы более высокого уровня иерархии формирует команды воздействия на x , y и z . Блок $W(x, y, z)$, пользуясь эталонной информацией, сравнивает фактические технические параметры x_f , y_f , z_f с эталонными $x_{эт}$, $y_{эт}$, $z_{эт}$, которые могут быть представлены зависимостями или массивами данных.

Обобщенный алгоритм функционирования системы контроля цифровых электронных устройств может быть представлен в виде, показанном на рис. 6.14.

Даже при идеально стабилизированных внешних параметрах характеристики измерительных систем могут произвольно меняться со временем, что приводит к ошибкам измерения. Для уменьшения ошибок в автоматизированной системе контроля вводится периодическая калибровка с помощью подсистемы калибровки. Возможна калибровка трактов измерений с фиксированным эталоном, когда проводят периодическую калибровку всего тракта при различных значениях сигналов. При таком подходе промежуточные точки не калибруются.

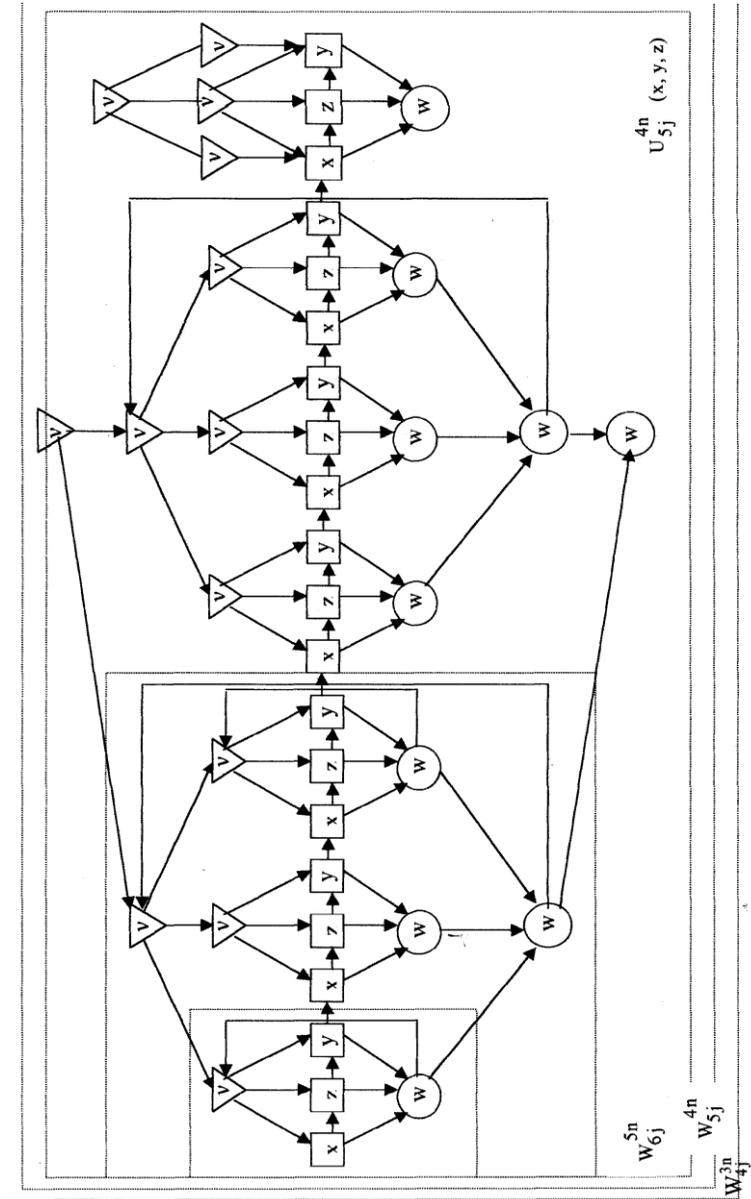


Рис. 6.13. Иерархическая структура АСК



Рис. 6.14. Обобщенный алгоритм управления работой АУИ радиоаппаратуры

Подсистема калибровки с плавающим эталоном может организовывать калибровочные измерения приблизительно при тех же значениях сигналов, при которых проведены измерения. Калибровка с помощью плавающего эталона сложнее в техническом отношении, однако точность и надежность результатов полученных величин здесь выше, так как оба измерения проводятся в приближённые моменты.

Не останавливаясь подробно на вопросах метрологического обеспечения, отметим, что, применяя вычислительные машины, можно вычислить все электрические параметры через значения трех физвеличин: напряжения, сопротивления и времени. При этом число эталонов сокращается до минут, а полная автоматизация процесса повысит производительность и уменьшит случайные ошибки при исследованиях. Но главным достоинством будет длительная моральная устойчивость системы, то есть способность осуществлять поверку самой современной измерительной аппаратуры системы контроля.

Автоматизация поверочных работ с применением вычислительных машин позволяет:

- сократить трудоемкость при одновременном увеличении производительности;

- освободить операторов от обработки данных и анализа результатов;

- повысить достоверность проверки за счет возможности повторения исследований, статистической обработки результатов и исключения субъективных ошибок исполнения;

- осуществить учет сроков проверки и оперативно анализировать состояние устройств, всего парка измерительных приборов в сроки между проверками.

Схема автоматической градуировки измерительных трактов (АГИТ) приведена на рис. 6.15.

Как уже отмечалось, наибольшую сложность представляет контроль работоспособности и измерение параметров цифровых устройств, осуществляемый на некотором подмножестве наборов входных и выходных сигналов, которые называются текстовыми. Могут использоваться статистический контроль параметров, функциональный контроль рабочей частоты и функционально-параметрический контроль. Определяющими факторами являются скорость и полнота контроля и диагностики неисправностей цифровых устройств. Методы построения текстовых последовательностей сигналов основываются на случайном поиске и алгоритмических способах.



Рис. 6.15. Схема АГИТ — управляющий вычислительный комплекс (УВК)

6.5. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

По составу и структуре программное обеспечение должно быть достаточным для выполнения всех функций, операций и действий системы контроля. Основой разработки ПО такой системы является математическое обеспечение, оно же определяет параметры и возможности программного обеспечения в целом. Программное обеспечение разделяется на общее и специальное.

Общее программное обеспечение (ОПО) автоматизированной системы контроля представляет собой совокупность программ, которые предназначены для организации эффективного вычислительного процесса (ВП) и рациональной загрузки ЦП. Оно ориентировано на решение часто встречающихся проблем организации ВП, обработки результатов, стандартных операций с наборами данных, которые рассчитаны на широкий круг пользователей, что облегчает разработку специального ПО для автоматизированной системы контроля.

ОПО системы контроля включает: программы ОС, обслуживающие и стандартные программы.

В миникомпьютерах программы ОС хранятся на ЗУ с прямым доступом, поэтому наибольшее распространение получили дисковые операционные системы (ДОС). В оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ) постоянно хранится, занимая небольшой объем памяти, управляющая программа дисковой операционной системы. Кроме управляющей программы, в состав программ ОС дисковых операционных систем входят: редактор; перемещаемый загрузчик; мнемокода, трансляторы с языков высокого уровня.

Обслуживающие программы обеспечивают: управление вводом-выводом данных; перемещение данных; обработку прерываний; обслуживание диалогового режима; тестирование и диагностику установок, блоков и узлов вычислительных машин.

В комплекс стандартных программ общего программного обеспечения автоматизированного комплекса испытаний входят: стандартные программы дисковой операционной системы и операционные системы разделения времени (РВ); стандартные программы языка «Фортран», «Макроассемблера» и других языков программирования.

В последнее время широкое распространение для магистрально-модульных комплексов вычислительных машин получила операционная система реального времени с разделением функций («Рафос»). К достоинствам «Рафос» относятся простота и удобство в эксплуатации. Работа с этой операционной системой не требует высокой квалификации оператора.

Специальное программное обеспечение (СПО) автоматизированной системы контроля представляет собой совокупность программ, которые разрабатываются при создании системы контроля для реализации ее функций, то есть обеспечивает решение спецзадач такой системы в соответствии с программой исследований или по спецзапросам операторов.

Совокупность взаимосвязанных программ, предназначенных для реализации функции или группы функций автома-

тизированной системы контроля, называется пакетом прикладных программ (ППП).

В базовый ППП системы испытаний входят: монитор программ контроля и исследований; программы отладки тестово-диагностического обеспечения; программы самоконтроля и диагностики неисправностей техсредств и т.п.

К операционным программам автоматизированного систем контроля относятся:

- программы автоматического выполнения контактирования радиоаппаратуры с измерительными целями системы контроля и проверки качеств контактирования; программы коммутации исследовательских целей и устройств;

- программы генерации сигналов по тестовым последовательностям и задания их на входных выводах контролируемой аппаратуры;

- программы приема и нормализации измеряемых сигналов, то есть перевода и преобразования сигналов в цифровую форму;

- программы сравнения измеренных сигналов с текстовыми; программы согласования целей; программы принятия решений по результатам контроля и исследований с целью обеспечения максимально высокой эффективности исследований;

- программы управления исследовательским оборудованием.

Программа обработки результатов исследований позволяет накапливать результаты опытов и проводить обработку.

Для определения общих закономерностей изменения параметров электронной аппаратуры, которые протекают на фоне большого числа случайных факторов, выполняется статистическая обработка результатов контроля параметров, которые были получены по результатам исследований. Для этого используются стандартные программы общего программного обеспечения автоматизированной системы испытаний, которая включает в себя:

- вычисление статистических оценок характеристик законов распространения случайных величин — параметров радиоаппаратуры;
- поиск аппроксимирующих законов распространения случайных величин;
- проверку теорий соответствия гипотетического закона к экспериментальному;
- оценки достоверности гипотез о виде закона случайной величины и характеристик законов распределения параметров;
- вычисление запасов устойчивости параметров к внешним воздействующим факторам и т. д.

Для формирования отображающей информации, то есть информации, которая оперативно характеризует свойства радиоаппаратуры и техпроцесс исследований, отклонения от нормального хода процесса исследований, используются спец-программы, например, программы графического построения области работоспособности, которые служат для визуального контроля результатов и принятия решения о работоспособности исследуемого устройства.

6.6. ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Разработка программного обеспечения ведется с учетом характеристик информации, которая хранится и обрабатывается в АСИ, а также с точки зрения оперирования данными. Можно выделить три вида информации, оперирующиеся в системе.

Входная информация, которая поступает в систему в виде документов, данных, сигналов с датчиков и т. д. необходима для выполнения системы контроля своих функций.

Выходная информация — это информация, которая выдает системе данные, которые, в свою очередь, отображают состояние АСК и объекта исследований на данный момент времени.

Сведения о качестве изделий необходимо представлять в виде графиков или других сопоставимых данных, а если нужно выделить вклад какого-либо ухудшающего воздействия в общий уровень результатов, то удобно представить каждое значение параметра в виде процентного отношения отказов этого вида к общему числу отказов.

Однородность продукции по качеству, стабильность технического процесса хорошо отражают: интегральные и дифференциальные распределения, дисперсию, процент несоответствия нормам, запасы по устойчивости. Однако не должно быть и однообразия в информации.

Вся информация должна храниться, но одновременно необходимо обеспечить легкий и простой доступ к ней, требуемый уровень достоверности и надежности. Поэтому желательно первичную входную информацию запомнить в том виде, какой она имела до преобразования, то есть неопределенно с датчиков. Важное место отводится дублированию информации.

Разнообразие задач, размеренность информации и разнородность форматов данных создают определенные трудности при работе АСК. Это диктует необходимость создания единой информационной базы АСК.

Информационная база АСК — совокупность упорядоченной информации, используемой для функционирования АСК.

Информационное обеспечение АСК должно удовлетворять следующим принципам:

- стремление к достижению оптимума функционирования АСК в целом, а не каких-то отдельных ее частей или режимов и выбору структур, ориентированных на всю совокупность форматов данных;

- типизация решений в целях обеспечения общности их применения для различных задач;

- возможности развития АСК (комплекса программ и т. д.) таким образом, чтобы увеличение информационной базы не сказывалось на возложенных на комплекс функциях.

Как уже отмечалось, важным является единство структуры представления информации в архиве и базы данных АСК. База данных — это совокупность используемых при функционировании АСК данных, организованная по определенным правилам, предусматривающим общие принципы описания, хранения и манипулирования данными.

6.7. ЛИНГВИСТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Удобным языком представления данных в архиве системы является язык представления графической и текстовой информации (ЯГТИ), который обеспечивает описание любых графических документов для установок текстового контроля (УТК) в виде перфолент и магнитных лент или дисков.

Данные, сформированные в соответствии с правилами этого языка, доступны для: хранения в архиве АСК или других систем; вывода в виде документации на различные периферийные устройства; вывода в виде перфолент или магнитных лент для УТК; редактирование данных средствами операционной системы и организации взаимодействия с другими системами (АСУК, АСУТП и САПР РЭА).

По степени зависимости от ЭВМ языки описания процессов контроля и испытаний РЭА относятся к языкам высокого уровня, а именно проблемно-ориентированным, то есть полностью не зависимым от машинного языка ЭВМ системы АСК. Ряд языков построен как проблемно-ориентированное расширение языков программирования (типа «Фортран», «Фокал», «Алгол», «Бейсик» и др.).

Задача создания самостоятельного языка высокого уровня является сложной, так как требует больших затрат времени. Наиболее известным языком этого типа является «Атлас». Разработанный вначале для испытаний электронного авиационного оборудования, он стал стандартным универсальным языком для автоматических испытаний радиоэлектронного оборудования. Этот язык можно отнести к директивным

языкам. На базе языка «Атлас» создан язык «Ока», описывающий алгоритм контроля.

На базе расширения проблемно-ориентированных языков разработаны языки «Тест», «Элекон – Ф», «Ястек», что позволяет использовать стандартные программы и другие возможности языка, взятого за основу.

Каждому оператору языка, описывающего процессы контроля, соответствует своя подпрограмма, обеспечивающая перевод в один или несколько операторов вызова программ, написанных на базовом языке.

Будущее остается за языками, специально предназначенными для описания процессов испытаний.

Такие языки должны:

- быть просты и доступны персоналу, незнакомому с программированием; использовать словарный набор и синтаксические конструкции, принятые в области испытаний РЭА;
- обеспечить максимальную независимость от конкретной испытательной и контрольно-испытательной аппаратуры, допускать возможность расширения и адаптации к параметрам новой аппаратуры и объектов испытаний;
- обеспечить возможность выполнения вычислений и построения разветвленных программ и процедур.

7. МЕТОДЫ ВИРТУАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭС НА МЕХАНИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ

Проектирование и создание современных электронных средств (ЭС) практически невозможно без предварительной оценки устойчивости её к механическим воздействиям. Среди различных методов испытаний одним из перспективных является метод математического моделирования, позволяющий провести быстро оценку работоспособности устройства, снизить затраты на его конструирование и получить высокую достоверность результатов испытаний.

В большинстве случаев конструкции ЭС очень сложны для расчетов вибраций. Этим во многом объясняется ограниченное применение расчетов при проектировании вибро- и ударопрочной аппаратуры, недоверие к таким расчетам, предпочтение экспериментальным методам оценки вибропрочности и виброустойчивости конструкций.

Но за расчетами — будущее. Они дают большой экономический эффект, и временная вычислительная техника открывает здесь огромные перспективы [5]. В настоящее время вопросы создания подсистем и пакетов прикладных программ для автоматизации анализа виброударопрочности конструкций ЭС приобретают все большую актуальность.

В разработке математического обеспечения подсистем и программных комплексов активную роль должны играть конструкторы, которые, с одной стороны, хорошо представляют суть проблем, с другой — выступают как пользователи. Поэтому рассмотрим принципы построения прикладных программ на уровне описания алгоритмов.

Программные комплексы совместно с ЭВМ образуют некоторую систему, предназначенную для моделирования механических процессов в проектируемой конструкции, возникающих при ударах и вибрациях. Такие системы стали называть имитационными, блок-схема такой системы представлена на рис. 7.1.

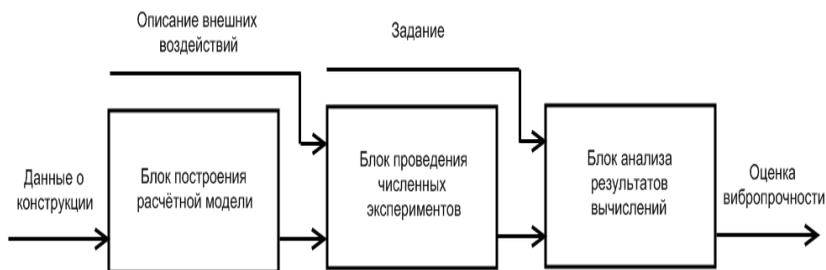


Рис. 7.1. Блок-схема имитационной системы

Имитационная система включает в себя следующие основные блоки:

1. Блок построения расчетной модели конструкции. Входной информацией здесь служит описание конфигурации конструкции и материалов ее деталей, описание способа их соединения. На выходе блока получается расчетная модель конструкции в виде системы разрешающих уравнений, описывающих динамическое равновесие дискретных элементов модели.

2. Блок проведения численных экспериментов. На вход этого блока поступает система разрешающих уравнений, а также описание внешних воздействий на конструкцию. В блоке эта система уравнений решается, и результаты решения передаются в блок анализа результатов.

3. Блок анализа результатов вычислений. Здесь происходит преобразование результатов расчета к форме, удобной для конструктора, в соответствии с его заданием.

Рассмотрим работу этих блоков.

7.1. БЛОК ПОСТРОЕНИЯ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

Разработаны и находятся в эксплуатации несколько программно-методических комплексов, предназначенных для расчетов типовых конструкций ЭС и электронно-вычислительной аппаратуры (ЭВА): стержневых конструкций, плат с навесными элементами, пакетов плат и пластинчато-стержневых конструкций. Эти комплексы непрерывно совершенствуются: расширяются их эксплуатационные возможности, сокращается объем «ручных» работ, появляются новые сервисные программы, которые облегчают работу пользователя-конструктора, повышают надежность вычислений. Совершенствуются и средства вычислительной техники. Все эти изменения происходят довольно быстро, и нет смысла в рамках данного пособия останавливаться на каком-то конкретном варианте системы. Поэтому мы рассмотрим некоторые общие принципы построения таких систем и их реализацию.

Система должна быть достаточно универсальной и пригодной для расчетов широкого круга различных конструкций. Но обычно повышение универсальности достигается за счет усложнения системы, увеличения объема вычислений, применения более мощной вычислительной техники.

Поэтому применение универсальных программных комплексов оправдано при необходимости анализа большого многообразия сложных конструкций. В случае расчета однотипных конструкций целесообразно использовать специализированные программные комплексы. Такие комплексы разработаны, например, для печатных плат, стержневых конструкций.

Однако даже универсальные системы имеют ряд ограничений, которые сужают круг решаемых задач. Для рассматриваемой системы эти ограничения обусловлены следующими факторами:

1. Все физические представления, используемые при разработке системы, основаны на положениях линейной теории упругости при малых перемещениях. При выводе уравнений равновесия напряжения в этой теории считаются пропорциональными соответствующим деформациям, перемещения полагаются достаточно малыми, и вследствие этого синусы и тангенсы углов поворота сечений деталей при деформациях — равными самим углам, и, главное, перемещения в различных точках конструкции рассматриваются как некоторые функции в этих точках, а сами точки считаются неподвижными. Если в конструкции возникают большие перемещения, не укладывающиеся в рамки линейной теории упругости, то результаты вычислений будут иметь погрешности, которые трудно оценить.

2. Все расчетные соотношения полечены с использованием прямоугольной ортогональной системы координат. Поэтому система предназначена для расчетов прямоугольных конструкций. Если в конструкции встречаются детали непрямоугольной формы, то они приближенно заменяются прямоугольниками. Это также вызывает появление погрешностей расчета.

3. Некоторые ограничения связаны с ограниченными возможностями современных вычислительных машин. И хоть эти возможности очень велики, для расчетов сложных конструкций они могут оказаться недостаточными. Дело в том, что с усложнением конструкций объем вычислений очень быстро возрастает.

Поясним это на примере. Предположим, что для воспроизведения в расчетной модели конфигурации сложной конструкции необходимо в каждом из трех направлений взять по 20 шагов, тогда в модели будет $20^3 = 8000$ дискретных элементов. Предположим далее, что каждый дискретный элемент имеет 6 степеней свободы, то есть вся модель имеет 48 000 степеней свободы. Необходимо, таким образом, решить систему алгебраических уравнений, матрица коэффициентов которой имеет размерность 48000×48000 . И хотя эта матрица получается слабо заполненной, объем вычислений, особенно при расчетах нестационарных процессов, когда эту систему уравнений приходится решать на каждом шаге по времени (а шагов в расчете может быть несколько тысяч), огромный. Применение специальных итерационных методов при решении стационарных задач и явных разностных схем при решении нестационарных задач в какой-то степени позволяет преодолевать эту трудность. Тем не менее, рассматриваемой системе, если даже она строится на базе супер ЭВМ, под силу решение задачи, если в расчетной модели не более нескольких тысяч элементов.

Рассмотренные ограничения являются общими для всех подобных имитационных систем. Их преодоление связано с развитием теории упругости, методов вычислительной математики и совершенствованием вычислительной техники.

Говоря о применяемом математическом аппарате, заметим, что в рассматриваемом варианте системы используются идеи метода конечных разностей. И хотя при построении разностных уравнений не применяются явным образом дифференциальные соотношения, тем не менее, полученные

уравнения обладают аппроксимацией и сходимостью, а алгоритмы — устойчивостью вычислений.

Большинство несущих конструкций аппаратуры имеет прямоугольную форму, то есть может быть представлено композицией из некоторого количества компонентов конструкции в виде прямоугольных параллелепипедов. Поэтому проще всего задать конструкцию в блоке построения расчетной модели в виде таблицы, в которой для каждого параллелепипеда указывается положение шести ограничивающих его плоскостей, и характеристики материала, из которого он сделан.

Далее нужно описать способ разбиения конструкции на дискретные элементы. Как правило, все элементы выбираются одинаковых размеров (мы ограничимся здесь этим случаем), поскольку сетка в этом случае регулярная, то достаточно указать число шагов сетки конструкции, укладываемых по длине в каждом из трех направлений, или размеры этих шагов h_x , h_y , h_z . На этом «ручная» подготовка входной информации заканчивается. Дальнейшее построение расчетной модели происходит в автоматическом режиме.

В блоке построения модели на основе таблицы размеров и характеристик материалов конструкции формируется матрица коэффициентов системы разрешающих уравнений. Это преобразование осуществляется в несколько этапов. Каждый этап имеет свой физический смысл.

Первый этап — разбиение. Конструкция разбивается на дискретные элементы плоскостями, параллельными координатным плоскостям, как показано на рис. 7.2. При разбиении следует стремиться к тому, чтобы эти плоскости не совпадали с гранями параллелепипедов. Внутри каждого дискретного элемента может попасть несколько частей компонентов конструкции. Эти части могут быть выполнены из разных материалов. Кроме того, могут быть и «пустые» элементы, в которые не попадает ни один компонент.

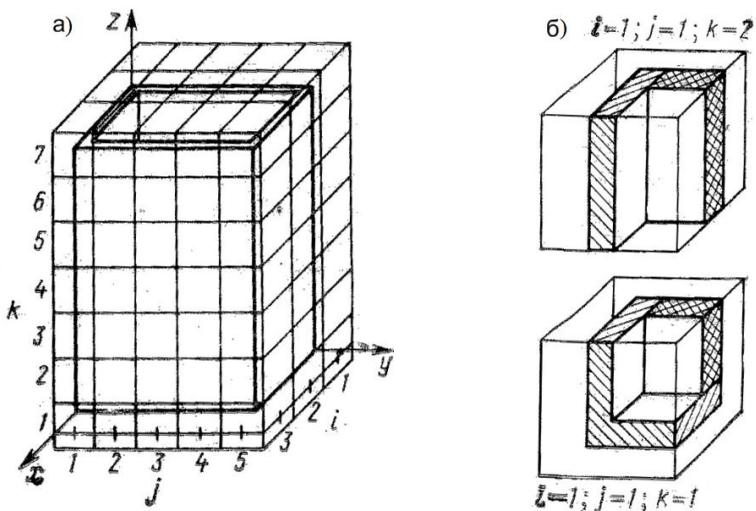


Рис. 7.2. Разбиение конструкции на дискретные элементы:
 а – расположение конструкции внутри сеточной области;
 б – дискретные элементы модели

Если в таблице компонентов имеются малые детали, размер которых меньше шагов сетки, то они могут целиком разместиться внутри дискретного элемента. В дальнейшем такие детали будут автоматически учитываться в расчёте лишь в инерционных характеристиках элементов.

В результате разбиения получаются неоднородные по своей структуре дискретные элементы. Каждая грань элемента может включать в себя различные области, образованные пересечением координатных плоскостей с компонентами конструкций.

Второй этап — осреднение. На этом этапе упругие свойства каждого дискретного элемента осветляются («размазываются») по всему дискретному элементу. Иными словами, неоднородные элементы заменяются однородными, которые в среднем деформируются так же, как и исходные неоднородные элементы. Осреднение должно производиться отдельно по каждому виду деформаций элемента. В расчетной модели

дискретные элементы могут подвергаться следующим деформациям: растяжению, (сжатию) в трех направлениях; сдвигу в трех плоскостях; изгибу в трех плоскостях; кручению в трех плоскостях.

Для каждого из этих 12 видов деформаций получается свое среднее значение жёсткости элемента. Формулы для вычисления жёсткостей дискретных элементов получаются при рассмотрении взаимодействия дискретных элементов в модели.

Третий этап — выражение деформаций через обобщенные перемещения. Состояния дискретного элемента в каждый момент определяется шестью переменными (рис. 7.3), тремя линейными перемещениями u , v и w в направлении соответствующих координатных осей и тремя углами поворота φ_x , φ_y и φ_z относительно этих осей. Перемещения и углы поворота называют обобщенными перемещениями и относят к центру дискретного элемента.

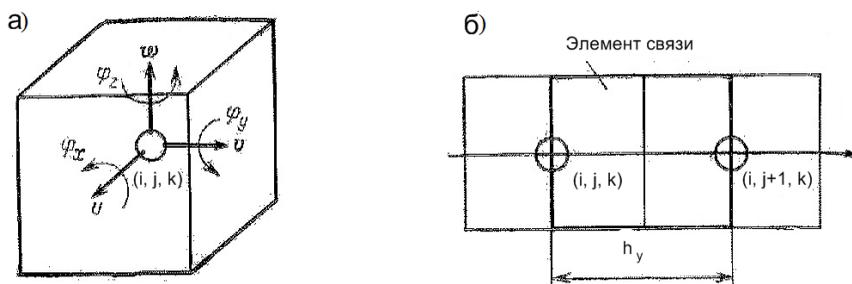


Рис. 7.3. Состояние дискретного элемента:

а – обобщённые перемещения элемента; б – деформация растяжения

Каждый дискретный элемент в общем случае взаимодействует с шестью ближайшими соседями. Это взаимодействие рассматривается как действие упругих сил и моментов, приложенных к каждой грани, которая находится между центрами двух соседних элементов. Элемент пространства между двумя соседними узлами называют элементом связи

(рис. 7.3, б). Элемент связи может испытывать вышеуказанные деформации. Каждый вид деформаций выражается через обобщенные перемещения в двух соседних узлах сетки. Рассмотрим эти деформации применительно к примеру, приведенному на рис. 7.3. Различают однородные и неоднородные деформации. Однородные деформации одинаковы по объему элемента связи. Например, растяжение в направлении оси y определяется как приращение длины элемента связи к первоначальной его длине:

$$\varepsilon_{yy} = \frac{g_{i,j+1,k} - g_{i,j,k}}{h_y}. \quad (7.1)$$

Сдвиг, показанный на рис. 7.4, определяется отклонением от прямого угла элемента связи за счет сдвига противоположных граней или же отклонением от прямого угла за счет поворота граней:

$$\varepsilon'_{zy} = \frac{\omega_{i,j+1,k} - \omega_{i,j,k}}{h_y}, \quad (7.2)$$

$$\varepsilon''_{zy} = \frac{\varphi_{X(i,j+1,k)} - \varphi_{X(i,j,k)}}{2}. \quad (7.3)$$

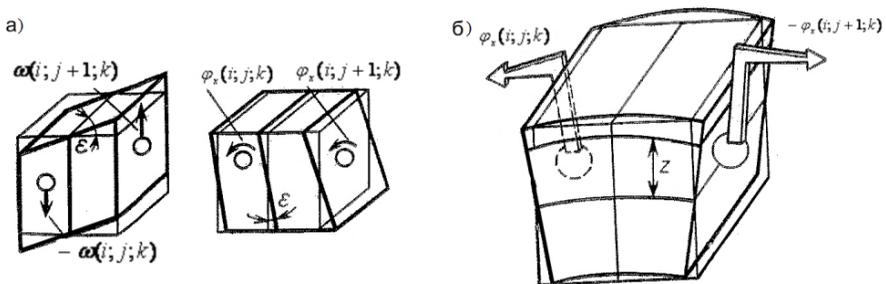


Рис. 7.4. Виды деформаций: а — деформация сдвига; б — деформация изгиба

Другие деформации элемента связи будут неоднородными, то есть непостоянными по объему элемента. Деформации изгиба (рис. 7.4, б) определяются поворотами противоположных граней в различные стороны относительно одной из осей этих граней. При этом верхняя часть элемента связи растягивается, а нижняя — сжимается (или наоборот). Эти деформации определяются относительным удлинением на расстоянии z от срединной поверхности элемента (7.3):

$$\varepsilon_{yy} = -\frac{\varphi_{X(i,j+1,k)} - \varphi_{X(i,j,k)}}{h_y} \cdot z. \quad (7.4)$$

Деформации кручения (рис. 7.5, а) вызываются поворотом противоположных граней элемента связи в разные стороны относительно центральной оси, нормальной к поверхности этих граней. Эти деформации определяются отклонением от прямого угла на расстояние z от центральной оси:

$$\varepsilon_{zy}(z) = \frac{\varphi_{Y(i,j+1,k)} - \varphi_{Y(i,j,k)}}{h_y} \cdot z. \quad (7.5)$$

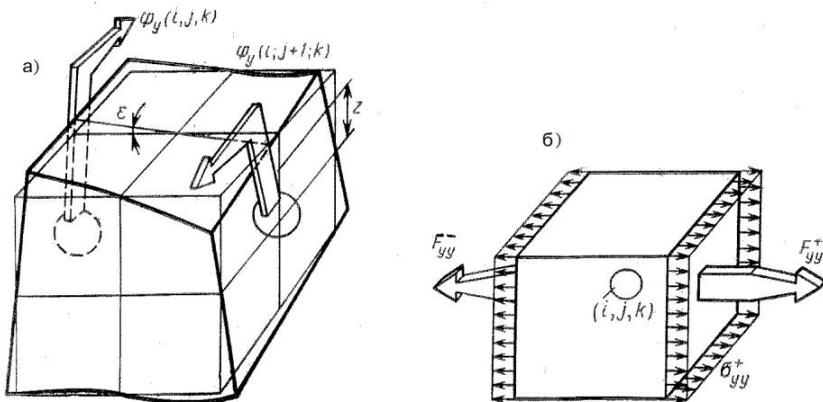


Рис. 7.5. Деформация кручения: а — деформация кручения; б — нормальные силы

Четвертый этап — выражение сил и моментов через деформации. Деформации растяжения определяют нормальные напряжения. Равнодействующая этих напряжений — нормальная сила, приложенная к грани дискретного элемента:

$$F_{yy}^+ = \sigma_{yy} h_x h_y = E \varepsilon_{yy} h_x h_y = c_{yy}^+ [\vartheta_{i,j+1,k} - \vartheta_{i,j,k}], \quad (7.6)$$

где

$$c_{yy}^+ = E \frac{h_x h_z}{h_y}.$$

Индексы «+», «-» на рис. 7.5, б указывают на то, что силы приложены к передней и задней (по отношению к узлу) граням элемента соответственно.

Деформации сдвига определяют касательные напряжения и касательные силы (7.6). На каждой грани дискретного элемента таких касательных сил будет две — в направлениях осей k и g . На рис. 7.6, а показана одна из них — F_{zy}^+ .

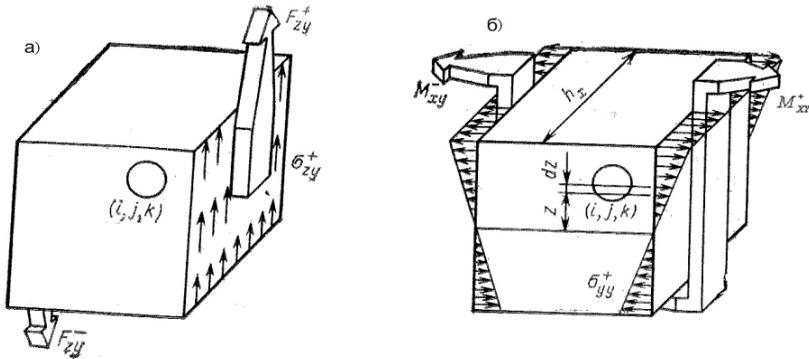


Рис. 7.6. Деформация сдвига: а — касательные силы; б — изгибающие моменты

$$F_{zy}^+ = \sigma_{zy}^+ h_x h_z = \mu (\varepsilon'_{zy} + \varepsilon''_{zy}) h_x h_z = c'_{zy} [\omega_{i,j+1,k} - \omega_{i,j,k}] - c''_{zy} [\varphi_{X(i,j+1,k)} + \varphi_{X(i,j,k)}], \quad (7.7)$$

где

$$c'_{zy} = \mu \frac{h_x h_z}{h_y}; \quad c''_{zy} = \mu \frac{h_x h_z}{2}.$$

Неоднородные деформации определяют моменты. Деформации изгиба определяют изгибающие моменты (рис. 7.6, б), а деформаций кручения — крутящие моменты (рис. 7.7).

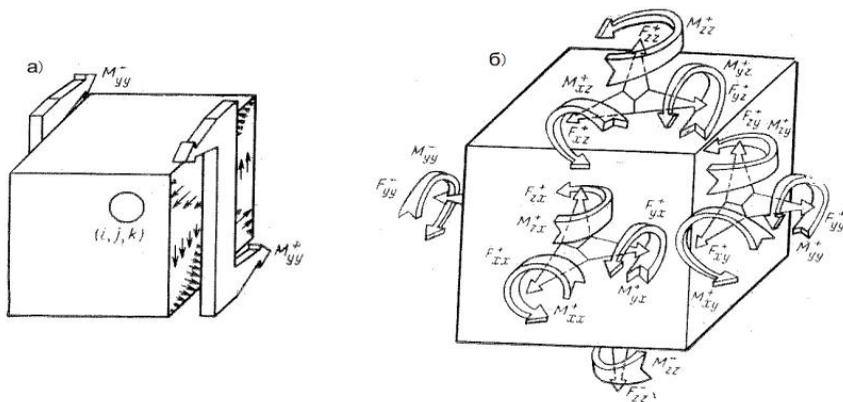


Рис. 7.7. Деформация кручения: а — крутящие моменты; б — к выводу уравнений динамического равновесия

$$M_{xy}^+ = \int_{-h_z/2}^{h_z/2} \sigma_{yy}^+ h_y h_x z dz = k_{xy}^+ [\varphi_{X(i,j+1,k)} - \varphi_{X(i,j,k)}],$$

$$M_{yy}^+ = k [\varphi_{Y(i,j+1,k)} - \varphi_{Y(i,j,k)}],$$

} (7.8)

где

$$k_{yy}^+ = \frac{Ej_{yy}^+}{h_y}; \quad j_{yy}^+ = \frac{h_x h_z}{12} (h_x^2 + h_z^2),$$

$$k_{xy}^+ = \frac{Ej_{xy}^+}{h_y}; \quad j_{xy}^+ = \frac{h_x h_z^3}{12}.$$

Приведенные формулы (7.6) и (7.7) для сил и моментов, изображенных на рис. 7.4–7.6, относятся к одной грани дискретного элемента. Для двух других граней формулы получают перестановкой символов. Такие же силы и моменты, но противоположного направления, приложены к соответствующим граням соседних элементов. Для неоднородных элементов связей в выражения сил и моментов должны входить средние значения коэффициентов жесткости.

Пятый этап — уравнения равновесия. К каждой грани дискретного элемента приложено по три силы и по три момента (рис. 7.7, б). Суммируя проекции сил и моментов на координатные оси, получают шесть уравнений динамического равновесия. Уравнения моментов получаются более сложными, поскольку в них, кроме изгибающих и крутящих моментов, входят еще и моменты от касательных сил. В качестве примера приведем уравнение проекций моментом на ось x .

$$\begin{aligned} & k_{xx}^+ [\varphi_{X(i,j+1,k)} - \varphi_{X(i,j,k)}] - k_{xx}^- [\varphi_{X(i,j,k)} - \varphi_{X(i,j-1,k)}] + \\ & + k_{xy}^+ [\varphi_{X(i,j+1,k)} - \varphi_{X(i,j,k)}] - \\ & - k_{xy}^- [\varphi_{X(i,j,k)} - \varphi_{X(i,j-1,k)}] + k_{xz}^+ [\varphi_{X(i,j,k+1)} - \varphi_{X(i,j,k)}] - \\ & - k_{xz}^- [\varphi_{X(i,j,k)} - \varphi_{X(i,j,k-1)}] + \\ & + \frac{h_y}{2} \{ c'_{zy} + [\omega_{i,j+1,k} - \omega_{i,j,k}] - c''_{zy} + [\varphi_{X(i,j+1,k)} - \varphi_{X(i,j,k)}] \} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{h_y}{2} \{c'_{zy} + [\omega_{i,j,k} - \omega_{i,j-1,k}] - c''_{zy} + [\varphi_{X(i,j,k)} - \varphi_{X(i,j-1,k)}]\} - \\
& - \frac{h_z}{2} \{c'_{yz} + [\vartheta_{i,j,k+1} - \vartheta_{i,j,k}] - c''_{yz} + [\varphi_{X(i,j,k+1)} - \\
& - \varphi_{X(i,j,k)}]\} - \\
& - \frac{h_z}{2} \{c'_{yz} + [\vartheta_{i,j,k} - \vartheta_{i,j,k-1}] - c''_{yz} + [\varphi_{X(i,j,k)} - \\
& - \varphi_{X(i,j,k-1)}]\} = J_x \frac{d^2 \varphi_{X(i,j,k)}}{dt^2}.
\end{aligned} \tag{7.9}$$

Все входящие в последнее уравнение моменты условно показаны на рис. 7.8. Каждому из моментов соответствуют определенные члены уравнения.

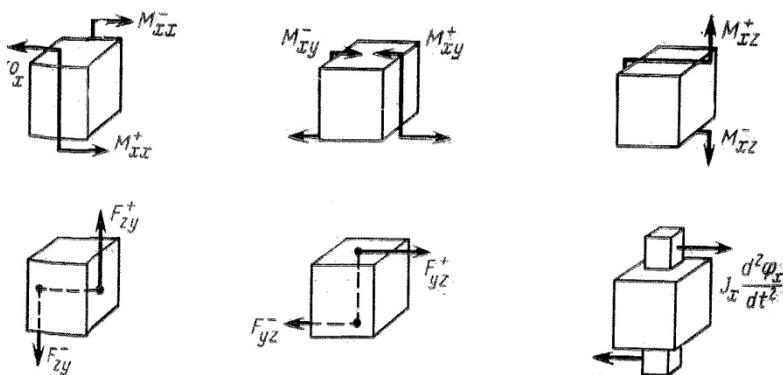


Рис. 7.8. К выводу уравнений проекций моментов на ось x

Первые два слагаемых в левой части уравнения относятся к моментам M_{xx} , следующие два слагаемых — к моментам M_{xy} , далее — к моментам M_{xz} . Последующие члены соответствуют моментам сил F_{zy} , F_{yz} . Правая часть уравнения содержит инерционный член — произведение момента инерции на угловое ускорение.

В уравнениях сил суммируются соответственно силы, их алгебраическая сумма приравнивается силам инерции.

При решении нестационарной задачи разностным методом ускорения в правой части представляются в разностной форме. Это позволяет, например, конструировать явную разностную схему и производить расчет последовательно по временным слоям. В задаче на собственные значения (вычисление резонансных частот и форм колебаний) в правую часть уравнений входит ω^2 . Этот итерационный процесс применяется и для расчетов с помощью рассматриваемой расчетной модели.

При решении стационарной задачи инерционные члены в правых частях уравнений полагаются равными нулю или заданной внешней нагрузке. Чаще всего для решения стационарной задачи применяют итерационный процесс, построенный по методу Зейделя. Заслуживает внимания замена стационарной задачи нестационарной задачей, в которой рассматривается процесс успокоения системы после прекращения действия внешних нагрузок. Этот способ называется способом релаксации. Но для использования этого способа необходимо в левую часть уравнения равновесия ввести дополнительные релаксационные члены.

Важно то, что при решении всех указанных задач левые части в уравнениях равновесия остаются в основном неизменными. Модель конструкции разрабатывается один раз и используется для различных расчетов без существенных изменений.

Важным обстоятельством для удобства программирования является также то, что вид уравнений для дискретных элементов, в том числе и граничных элементов, одинаков. Поэтому, во-первых, не нужно принимать никаких специальных мер для удовлетворения граничных условий задачи. В частности, в уравнения для граничных элементов не входят члены, соответствующие силам и моментам на свободных краях, то есть выполняются граничные условия для свободных краев. Эта процедура производится автоматически, на основе

анализа наличия или отсутствия связей с соседними элементами. Граничные условия на свободных краях выполняются автоматически. В точках, в которых задаются внешние воздействия, в уравнениях вводятся дополнительные члены. Во-вторых, для задания уравнений равновесия достаточно задать 5 коэффициентов в уравнении сил или 7 коэффициентов в уравнении моментов. Следовательно, для задания расчетной модели конструкции достаточно вычислить для каждого дискретного элемента 36 коэффициентов жесткости. Заметим, что коэффициенты в уравнении, отмеченные сверху знаком «-», относятся к соседним элементам, а знаком «+» — к данному элементу.

Кроме коэффициентов жесткости, для каждого дискретного элемента нужно вычислить его массу и три момента инерции. Таким образом, в процессе построения расчетной модели нужно для каждого дискретного элемента вычислить 40 величин. Модель конструкции, в которую входит 8 000 элементов, будет содержать 320 000 коэффициентов. При заданных внешних механических воздействиях возникающие в конструкции вибрации во многом зависят от способа крепления конструкции к подвижному объекту. Этот способ крепления должен быть отражен в расчетной модели. Отдельные элементы модели могут крепиться к объекту жестко или шарнирно. Кроме того, между элементами модели и объектом могут быть установлены различные шарниры, амортизаторы и демпферы. Через эти элементы передаются внешние воздействия. В частности, элементы крепления могут быть неподвижными. Тогда при жестком закреплении у таких элементов исключаются все 6 степеней свободы, то есть приравниваются нулю все шесть обобщенных перемещений. При шарнирном закреплении у элементов сокращается часть степеней свободы. Например, шаровой шарнир препятствует только линейным перемещениям, а цилиндрический шарнир (петля) препятствует линейным перемещениям и поворотам в двух направлениях. Могут также применяться для крепления различные комбинации шарниров и направляющих. Все они

исключают у соответствующих дискретных элементов какие-то степени свободы. Поэтому в модели должны быть указаны номера закрепленных элементов и способ крепления. Это описание и позволяет задавать внешние воздействия в процессе расчетов в блоке численных экспериментов.

7.2. БЛОК ПРОВЕДЕНИЯ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

С помощью рассматриваемой имитационной системы могут производиться расчеты деформированного состояния проектируемой конструкции. Рассматриваются следующие случаи:

1. Статистическое нагружение силами и моментами. На конструкцию могут действовать внешние силы и моменты, передаваемые через точки крепления (например, от двигателей), внутренние силы и моменты, возникающие при движении объекта с ускорением — линейным или угловым (например, при испытании аппарата в центрифуге). Важно, что эти силы и моменты известны и постоянны во времени, и необходимо решать статическую задачу, в которой все величины не зависят от времени.

В этом случае левая часть системы уравнений расчетной модели формируется обычным порядком, в правой части соответствующих уравнений появляются постоянные величины — инерционные члены или внешние силы и (или) моменты.

Заметим, что решение таких систем большой размерности связано с определенными трудностями. В частности, объем вычислений при решении системы уравнений каким-либо прямым методом, например методом Гаусса, растет пропорционально кубу числа уравнений. Кроме того, быстро нарастают погрешности округления, и никакое увеличение разрядности чисел здесь не помогает.

Наиболее эффективным методом решения статической задачи, по-видимому, является итерационный метод. Однако выбор из множества различных итерационных методов наиболее рационального требует специальных исследований.

Заметим что простейший итерационный метод — метод Зейделя — требует выполнения значительно меньшего объема вычисления, чем прямые методы, например метод Гаусса.

Другой подход — перевести задачу в разряд динамических и решить ее, как указывалось выше, методом релаксации. Решение нестационарной, динамической задачи может оказаться здесь более экономичным, чем решение стационарной задачи. Но в этом случае нужно ввести в уравнение равновесия релаксационные члены.

2. Стационарное (установившееся) движение по известному закону по времени. В некоторых редких, но важных для практики случаях закон изменения во времени обобщенных перемещений всех незакрепленных элементов модели заранее известен. Например, в случае резонанса все точки конструкций колеблются по гармоническому закону во времени с одинаковой частотой и фазой.

В этом случае время из расчетных соотношений можно исключить. Получается стационарная задача — задача на собственные значения. Матричной форме система алгебраических решений в задаче на собственные значения записывается очень компактно:

$$A_x = \omega^2 x, \quad (7.10)$$

где A — матрица коэффициентов (в наших задачах это коэффициенты жесткости расчетной модели);

x — вектор неизвестных обобщенных перемещений;

ω — собственные частоты конструкции.

В наших задачах матрица A является квадратной, действительной, симметричной и очень разреженной. Из общего числа N неизвестных в одном уравнении не более 72 могут иметь коэффициенты, отличные от нуля. И нам нужно

вычислить всего несколько резонансных частот и форм колебаний. Часто достаточно вычислить частоту и форму одной низшей гармоники колебаний при резонансе.

3. Нестационарные переходные процессы деформирования. В практике конструирования нестационарной аппаратуры наиболее часто возникают именно нестационарные задачи, в которых закон движения по времени частей конструкции заранее неизвестен. Зависимость от времени исключить из уравнений не удастся. Искомые функции, например обобщенные перемещения, становятся функциями трех координат и времени.

Нестационарные процессы конструкций могут вызываться как внешними, так и внутренними факторами. При численном решении задачи и внутреннее, и внешнее воздействия задаются аналогично.

В теории упругости различают кинематическое и силовое воздействия на конструкцию. При кинематическом воздействии считаются известными в некоторых точках обобщенные перемещения. При силовом воздействии считаются известными силы и (или) моменты, приложенные в определенных точках. Можно задавать также различные распределенные нагрузки. Наконец, не исключен случай задания в одних точках кинематических, а в других — силовых воздействий.

Бывают в конструкциях особые точки, в которых внешняя сила зависит от перемещений этой и соседних точек конструкции. Такими точками, например, могут быть точки соединения с амортизаторами и демпферами. Если эта зависимость известна, то такие внешние воздействия также можно вводить в блок проведения численных экспериментов в качестве исходных данных.

Таким образом, в блок проведения численных экспериментов необходимо ввести список дискретных элементов, для которых задаются внешние воздействия, а также задать вид этих воздействий, например, закон изменения обобщенных перемещений во времени или закон изменения сил и моментов.

Этот закон может быть дан в виде аппроксимирующих формул или в виде таблиц.

Следует заметить, что при задании внешних воздействий необходимо исключить свободное движение конструкции как единого целого. В противном случае она может перемещаться или поворачиваться и отдельные обобщенные перемещения будут неограниченно возрастать. Для исключения такого движения достаточно задать шесть различных обобщенных перемещений в произвольных точках, например, для одного элемента — три перемещения и три угла поворота либо для шести элементов — по одному перемещению или углу поворота для каждого.

Нестационарные задачи называют также задачами с начальными условиями. В начальных условиях нужно задать начальное состояние конструкции, то есть обобщенные перемещения и обобщенные скорости всех дискретных элементов конструкции в начальный момент. При разностном решении скорость представляется как первая разность от перемещений по времени. Поэтому начальное состояние задается в виде двух значений перемещений в два момента, разделенных шагом по времени.

Начальное состояние конструкции выбирают таким, чтобы можно было легко задать начальные условия задачи. Чаще всего считают, что конструкция в начальный момент не деформирована, то есть обобщенные перемещения во всех точках конструкции при $t = 0$ одинаковы. При этом конструкция может быть неподвижной, тогда все перемещения в два начальных момента принимаются равными нулю. Если же конструкция в начальный момент движется как единое целое с заданной скоростью, то при поступательном движении углы поворота всех элементов полагаются равными нулю, а перемещения в направлениях координатных осей в два начальных момента выбираются такими, чтобы они соответствовали компонентам скорости. Можно, конечно, задать и начальное вращательное движение конструкции, но это несколько сложнее, поскольку нужно согласовать величины углов и перемещений так, чтобы конструкция была не деформирована.

В отдельных случаях задача легче формулируется, если в начальных условиях задать некоторое деформированное состояние конструкции. Например, для плоских конструкций типа пластин или коробок, которые представляются в виде развертки, часто можно приближенно определить первую собственную форму колебаний. Если такую форму задать в начальных условиях при нулевой скорости элементов и решать нестационарную задачу на половину периода колебаний основного тона (половине периода будет соответствовать положение, приближенно совпадающее с исходной формой, но только с обратным знаком), то по величине половины периода $T/2 = n\tau$, n — число шагов расчета, можно получить значение первой резонансной частоты $f_1 = 1/2n\tau$. Это пример возможного перехода от стационарной задачи на собственные значения к нестационарной задаче.

Так или иначе в блоках численных экспериментов должны быть заданы две таблицы начальных значений обобщенных перемещений всех дискретных элементов модели. Кроме того, должны быть заданы матрица коэффициентов системы уравнений равновесия и внешние воздействия. Эта информация служит исходными данными для решения нестационарной задачи.

7.3. БЛОК АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫЧИСЛЕНИЯ

При цифровом моделировании механических процессов, происходящих в конструкциях при их статическом и динамическом нагружении, конструктора могут интересовать различные вопросы:

1. Выдержит ли конструкция статические или динамические нагрузки в процессе эксплуатации при заданных внешних воздействиях? Не произойдет ли авария?
2. Если конструкция выдерживает внешние воздействия, то какими запасами прочности она обладает?

3. Какими будут максимальные деформации в определенных местах конструкции, например на поверхности печатных плат?

4. Какими будут ускорения (перегрузки) в местах крепления элементов схем, чувствительных к перегрузкам?

5. Какими будут амплитуды и частоты колебаний различных частей конструкции?

Ответы на эти и на многие другие вопросы содержатся в результатах вычислений, полученных в блоке численных экспериментов. Нужно только соответствующим образом обработать эти результаты. При решении нестационарных задач эту обработку нужно производить параллельно с вычислениями по временным слоям. При этом не нужно хранить в памяти машины значения обобщенных перемещений на всех временных слоях. В памяти хранят только перемещения на трех очередных временных слоях.

Затем они будут заменяться последующими значениями перемещений.

Анализ результатов начинается с вычисления величин, производных от обобщенных перемещений: деформаций, напряжений и ускорений. В отдельных случаях могут потребоваться значения сил и моментов. Эти величины вычисляются либо для всех элементов модели конструкции, либо только в отдельных, наиболее опасных, местах, которые укажет конструктор.

Для двух других граней, видимых на рисунках, формулы можно получить циклической перестановкой индексов. Такая циклическая перестановка равносильна повороту осей координат. Например, если в приведенных формулах заменить $x \leftarrow y \leftarrow z \leftarrow x$; $u \leftarrow \vartheta \leftarrow \omega \leftarrow u$; $i \leftarrow j \leftarrow k \leftarrow i$, то получатся формулы для грани с нормалью z . Если же сделать такую циклическую перестановку еще раз, то для грани x .

Таким образом, будут получены формулы для всех трех видимых на рисунках граней (их называют фасадными гранями). Противоположные (задние) грани элемента будут фасадными гранями соседних элементов, и соответствующие

напряжения, силы и моменты будут вычисляться по тем же формулам, но для соседних элементов.

Ускорения вычисляются по разностной формуле, при этом используются значения перемещений или углов поворота дискретных элементов на трех временных слоях. Их нужно вычислять в каждом шаге по времени после вычисления обобщенных перемещений на следующем временном слое $m + 1$, когда в памяти машины будут находиться все три значения каждого обобщенного перемещения в моменты $m - 1$; m ; $m + 1$.

Таким образом, параллельно с вычислением перемещений производится вычисление и всех интересующих конструктора величин: деформаций, напряжений, сил, моментов и ускорений. Заметим, что все эти величины входят как составные части в уравнения равновесия и при соответствующем построении алгоритма расчета их значения получаются как промежуточные при вычислении обобщенных перемещений.

Следующий этап анализа результатов вычислений — обнаружение максимальных по модулю значений указанных величин. Для этого каждое вычисленное новое значение производной величины сравнивается по модулю со значением, которое до этого было максимальным. Если новое значение больше старого, то оно записывается на место старого. Кроме того, для максимальных значений нужно указывать место, в котором они возникли: координаты узла (i, j, k), время (t), направление действий (k, y или z) и грань, для которой они вычислены (x, y или z). Таким образом, если других требований конструктора нет, в результате получается всего от одного до восьми значений указанных величин для всей конструкции в целом или для каждого материала, применяемого в конструкции.

8. МЕТОДЫ ВИРТУАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭС ПРИ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗКАХ

Испытания являются одним из важнейших этапов жизненного цикла продукта. Проведение испытаний позволяет определить пригодность применения материалов и сырья для изготовления продукции, проконтролировать качество получаемого материала, а также определить возможность использования технологических приемов и методов при изготовлении изделий. Одним из важнейших видов испытаний на внешние факторы является испытание на тепловые воздействия, позволяющие провести проверку параметров и сохранности внешнего вида изделий в условиях воздействия повышенной температуры при эксплуатации. Среди различных методов испытаний одним из перспективных является метод математического моделирования, позволяющий провести относительно быстро оценку работоспособности устройства, снизить затраты на его конструирование и получить высокую достоверность результатов испытаний.

Температурные воздействия окружающей среды являются одним из основных климатических факторов, обуславливающих нестабильность и деградацию параметров ЭС. Существенное влияние температуры на стабильность параметров ЭС обусловлено температурной зависимостью электрофизических параметров материалов. Определенную опасность для ЭС представляют резкие колебания температуры окружающей среды вследствие наличия в конструкции сопряженных материалов с различными температурными коэффициентами линейного расширения (ТКЛР).

Тепловое проектирование — проектирование конструкции, которое позволяет обеспечить требования к нормальному тепловому режиму аппаратуры. Задачи теплового проектирования ЭС решаются поэтапно в соответствии с иерархическими уровнями конструирования. На каждом этапе параметры конструкции и системы охлаждения выбирают исходя из требований к характерным температурам модулей (конструктивных

единиц) данного уровня. При разработке конструкции и системы охлаждения исходными данными являются требования к допустимым средним температурам блоков и температурам теплоносителей на входе в блоки. Эти допустимые температуры, в свою очередь, определяются при анализе теплового режима блоков и плат на основе требований к допустимым температурам корпусов элементов. Допустимые температуры корпусов элементов находят при анализе температурных полей интегральных схем (ИС) и микросборок (МСБ).

Тепловое проектирование на каждом этапе включает решение следующих основных задач:

- 1) выбор базовой конструкции и схемы системы охлаждения;
- 2) выбор параметров конструкции и системы охлаждения;
- 3) расчет температурных полей на данном уровне и проверка выполнения требований к допустимым температурам;
- 4) оптимизация параметров конструкции и системы охлаждения.

На начальном этапе проектирования для выбора базовых конструкций и их основных параметров используются методики, использующие ограниченную информацию о рассеиваемых мощностях, допустимых температурах, условиях эксплуатации и ограничениях на габариты. При тепловом проектировании блоков возникают задачи выбора базовой схемы системы охлаждения и основных параметров конструкции в условиях, когда отсутствует информация о распределении мощностей по отдельным платам и их размещении в блоке. Исходными данными для решения этой задачи являются суммарная мощность $\sum P$, выделяемая в блоке, максимальная температура среды $T_{ср}$, размеры ячеек на печатных платах l_x, l_y .

Кроме того, задаются некоторые ограничения: например, предельно допустимые габариты блока L_x, L_y, L_z или ограничения на расходы воздуха при принудительной вентиляции, или требования герметичности корпуса и т. д.

Для установки связи между перегревами нагретой зоны блоков и удельным тепловым потоком на единицу площади наружной поверхности нагретой зоны используют вероятностные зависимости. Такие зависимости построены для блоков в герметичном корпусе с естественным воздушным охлаждением и с внутренним перемешиванием воздуха и для блоков в перфорированном корпусе с естественной и принудительной вентиляцией. На основе этих зависимостей проводится выбор той или иной базовой схемы системы охлаждения блока.

На основе моделей блоков получают более детальные зависимости, которые связывают мощность, максимальный из средних перегревов плат и основные параметры конструкции блока. Выбор основных и не основных параметров должен быть проведён на основе предварительного математического моделирования.

Для построения искомым зависимостей при каждой фиксированной совокупности значений основных параметров выполняется многократный расчет T_{\max} для L случайных наборов значений не основных параметров. Совокупность полученных случайных значений $\{T_{\max}, L\}$ подвергается статистической обработке, и находятся оценки математического ожидания и дисперсии. Эти оценки определяют наиболее вероятный тепловой режим при заданных основных параметрах и возможные отклонения температуры из-за различия в неосновных параметрах.

Для обобщения результатов вводится параметр θ , равный отношению перегрева центральной платы к мощности, приходящейся на единицу площади ячейки:

$$\theta = (T_{\max} - T_{\text{cp}}) l_x l_y / P. \quad (8.1)$$

Введение в качестве искомой характеристики теплового режима параметра θ позволяет перевести мощность P и температуру среды T_{cp} в группу не основных параметров, сократив тем самым число основных параметров.

После выбора базовой конструкции решение задач компоновки модулей, корректировки конструктивных и режимных параметров проводится в режиме диалога на ЭВМ путем сочетания неформальных процедур перебора и анализа вариантов с формальными процедурами оптимизации. Математическим обеспечением этого этапа проектирования являются пакеты прикладных программ, которые реализуют методики расчета теплового режима на различных конструктивных уровнях аппаратуры. Информационное обеспечение включает базы данных по свойствам материалов, параметрам типовых конструктивных элементов, характеристикам «тепловой элементной базы» (радиаторы, вентиляторы, теплообменники, тепловые трубы и т. д.).

Опыт решения реальных задач проектирования показывает, что определяющую роль играют неформальный перебор и анализ вариантов конструкций, проводимый человеком. При этом задача автоматизированной подсистемы теплового проектирования — дать пользователю инструмент для оперативного расчета температурных полей с требуемой степенью детализации, позволяющий быстро и удобно вносить коррекции в описание исследуемой конструкции. Однако при решении отдельных задач весьма эффективным является применение формальных процедур оптимизации.

При размещении элементов в электронном устройстве необходимо совместно учитывать коммутационные и тепловые требования. Во многих случаях коммутационные требования при размещении состоят в минимизации длин связей (электрических соединений) между элементами.

Процесс переноса тепловой энергии в пространстве с неоднородным полем температуры называется теплообменом. Теплообмен вычисляется тремя способами:

- конвекция;
- теплопроводность;
- тепловое излучение.

Температурным полем называется совокупность значений температуры для всех точек пространства в данный

момент времени. Температура поля — это скалярная величина. Если температура является функцией только пространственных координат, процесс теплообмена стационарный и температурное поле стационарное. Если температура изменяется, то процесс теплообмена и температурное поле нестационарны. Если соединить точки теплотехнического объекта, имеющие одинаковую температуру, получим поверхность, называемую изотермической.

Уравнение теплопроводности может быть получено на основе закона сохранения энергии, и для тепловой системы он будет следующий: изменение во времени количества тепловой энергии в элементарном объеме равно сумме притока (стока) энергии через его поверхность с учетом выделения энергии в том же объеме в единицу времени внутренними источниками:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -\operatorname{div} \vec{q} + G_Q, \quad (8.2)$$

где Q — количество тепловой энергии в единице объема; \vec{q} — вектор плотности теплового потока; G_Q — количество энергии, выделяемой в единицу времени.

Данная величина характеризует мощность внутренних источников теплоты. Изменение количества тепловой энергии в единице объема пропорционально изменению температуры:

$$dQ = C\rho dt, \quad (8.3)$$

где C — удельная теплоемкость материала; ρ — плотность материала.

Плотность теплового потока \vec{q} , в соответствии с законом Фурье, пропорциональна градиенту температуры:

$$\vec{q} = \lambda \cdot \operatorname{grad} t, \quad (8.4)$$

где λ — коэффициент теплопроводности.

Следовательно

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = (C\rho)^{-1}[\operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad} t) + G_Q]. \quad (8.5)$$

Для однородного изотропного тела $\lambda = \operatorname{const}$, выражение дивергенции градиента температуры можно записать в следующем виде:

$$\operatorname{div} \operatorname{grad} t = \nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}. \quad (8.6)$$

Для одномерного случая, когда теплопередача осуществляется только в одном направлении, можно записать

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_T \cdot \partial^2 T / \partial x^2 + G_0 / C\rho, \quad (8.7)$$

где

$$a_T = \lambda / C\rho.$$

Для решения последнего уравнения должны быть заданы функция G_Q и краевые условия. Кроме этого, необходимо описание геометрии объекта и свойств объекта и среды. Для многих объектов G_Q можно принимать равным нулю. К таким объектам стоит отнести твердые тела, стенки теплообменников, барабаны различных фрикционных муфт и т. д. В этом случае для материала, обладающего изотропными свойствами:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_T \nabla^2 T. \quad (8.8)$$

При описании граничных условий, в зависимости от наличия информации о теплообмене на граничной поверхности, принимаются различные допущения. В простейшем случае задают граничные условия 1-го рода. То есть задается распределение температуры на граничной поверхности как функция координат и времени:

$$T_s = \varphi(x, y, z, t). \quad (8.9)$$

Граничные условия 2-го рода описывают распределение производных температуры по пространственным координатам:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_s = \psi(x, y, z, t). \quad (8.10)$$

В этом случае $\frac{\partial T}{\partial n}$ — модуль вектора градиента температур.

Граничные условия 2-го рода характеризуют распределение плотности теплового потока на граничной поверхности.

При отсутствии теплового потока теплообмен с окружающей средой не осуществляется, то есть граничная поверхность объекта теплоизолирована, и в этом случае граничное условие $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$.

Граничные условия 3-го рода позволяют конкретизировать характеристики теплообмена с внешней средой, при этом задается распределение плотности теплового потока на граничной поверхности.

При конвективном теплообмене плотность теплового потока на граничной поверхности пропорциональна разности температуры окружающей среды и температуры граничной поверхности. В этом случае

$$\overline{q}_s = \alpha(T_c - T_s). \quad (8.11)$$

Последнее уравнение выражает закон Ньютона, и данное уравнение можно записать для баланса тепловых потоков в следующем виде:

$$\frac{\lambda \cdot \partial T}{\partial n} + \alpha(T_c - T_s) = 0. \quad (8.12)$$

Данное уравнение выражает граничные условия 3-го рода при конвективном теплообмене. Граничные условия 1-го и 2-го рода являются частными случаями данного уравнения.

Если $\alpha \rightarrow \infty$ и $\lambda = const$ или $\alpha \rightarrow \infty$ и $\infty = const$, то T_c и T_s равны. Следовательно переходим к граничному условию 1-го рода.

Если $\alpha \rightarrow 0$, получим граничное условие 2-го рода.

При лучистом теплообмене между твердым телом и внешней средой плотность теплового потока определяется по закону Стефана – Больцмана:

$$q = \varepsilon \sigma (T_c^4 - T_s^4), \quad (8.13)$$

где ε — степень черноты поверхности; σ — постоянная Стефана – Больцмана.

На основе предыдущих уравнений можно получить уравнение граничных условий для одномерного теплотехнического объекта. Уравнения 1-го рода будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} T_{S0} = \varphi_1(t), x = 0; \\ T_{SL} = \varphi_2(t), x = L'. \end{cases} \quad (8.14)$$

где, T_{S0}, T_{SL} — температура на границах (левой и правой).

Уравнения 2-го рода

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{S_0} = \psi_1(t), x = 0; \\ \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{S_L} = \psi_2(t), x = L. \end{cases} \quad (8.15)$$

Граничные условия 3-го рода

$$\begin{cases} \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{S_0} + \alpha_0 (T_{C_0} - T_{S_0}) = 0, x = 0; \\ \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{S_L} + \alpha_L (T_{C_L} - T_{S_L}) = 0, x = L. \end{cases} \quad (8.16)$$

Отметим, что на левой и правой граничных поверхностях могут быть различные виды теплообмена.

Многие объекты выполняются многослойными. Обычно один из слоев обеспечивает несущую способность, другие выполняют роль теплоизолирующих или фрикционных элементов. В многослойных объектах, наряду с теплопроводностью, имеет место теплообмен, и математическая модель такого объекта должна включать условия теплообмена.

При анализе температурных полей все части объекта необходимо рассматривать совместно. Для каждой части записывается свое уравнение теплопроводности, краевыми условиями будут условия сопряженности, которые выражают равенство температур и равенство тепловых потоков на поверхностях соприкасающихся частей. Эти уравнения будут являться граничными условиями 4-го рода.

Если внешние воздействия на объект, характеризуемые функциями краевых условий, непостоянны, процесс теплопередачи будет нестационарным, поэтому, кроме краевых условий, нужно задавать начальные условия.

Совокупность уравнений теплопроводности и граничных условий составляет математическую модель теплового объекта на микроуровне. Результатом решения данного уравнения является температурное поле объекта.

9. ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА CREO ДЛЯ АНАЛИЗА МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЭМ

В настоящее время существует большое количество САЕ систем, которые позволяют проектировать конструкции РЭС, а также заниматься моделированием различных процессов, которые могут оказывать влияние на проектируемый прибор. К таким системам можно отнести ANSYS, NASTRAN, SolidWorks, Creo. Последняя система как раз является наиболее распространенной САЕ системой для проведения различных моделирований. Сам программный комплекс Creo состоит из различных подпрограмм, каждая из которых отвечает за определённый процесс. Ниже перечислены самые часто используемые приложения комплекса Creo:

Creo Parametric является основной программой всего комплекса Creo. Из данной программы можно перейти в любую другую подпрограмму комплекса Creo. Она обладает следующими функциями:

- твердотельное 3D-моделирование;
- прямое моделирование;
- эффективное моделирование сборок;
- проектирование документации, включая 2D- и 3D-чертежи;
- построение поверхностей;
- моделирование листовых деталей;
- моделирование сварных соединений и каркасных конструкций;
- функции анализа;
- графика и встроенная анимация конструкций;

- конструирование для аддитивного производства;
- модельно-ориентированное проектирование;
- обмен данными;
- работа с импортированными сторонними данными;
- встроенные функции работы с ЧПУ;
- мгновенный доступ с помощью веб-инструментов;
- библиотека деталей, функций, инструментов и т. д.;
- пользовательская настройка программного обеспечения;

- проектирование интеллектуальных сетевых изделий.

Creo Simulate – модуль, в котором можно производить механические и температурные анализы. Данный модуль построен на функции конечно-элементного анализа FEA, что позволяет ему производить многочисленные различные моделирования; обладает следующими функциями:

- структурный КЭ-анализ;
- линейный термический анализ стационарных процессов;
- библиотеки материалов;
- построение сеток;
- оптимизации;
- постобработка;
- позволяет исследовать влияние нелинейных напряжений;

- позволяет оценивать влияние многократных нагрузок и повторяющегося нагружения на конструкцию.

Creo Layout – программный модуль для создания редактирования 2D-чертежей, также в данной подпрограмме существует возможность создания 3D-моделей из 2D-чертежей.

Creo Direct – приложение для создания и редактирования уже готовых 3D-моделей, имеет большую библиотеку шаблонов для проектирования.

Creo Options Modeler – программный модуль предназначенный для создания и проверки собранных конструкции в 3D. Данная подпрограмма позволяет проверить параметры будущего прибора, например массу, центр тяжести, а также проверить и устранить ошибки в местах соединения 3D-моделей.

Creo ModelCHECK – данная подпрограмма позволяет проверить 2D-чертежи и 3D-модели на соответствие международным стандартам и ГОСТ.

При использовании в качестве базы инструментальных средств анализа программного комплекса Сгео общая методика проведения моделирования тепловых и механических характеристик включает следующие основные этапы:

1. Создание 3D-моделей конструкции.
2. Анализ требований ТЗ и условий эксплуатации, выделение основных типов внешних и внутренних воздействий (механические нагрузки, тепловыделение).
3. Определение конкретной формы воздействующих факторов (вибрация, удары, линейные ускорения, сипы, температура, тепловой поток, температурный градиент и т. д.) и их количественных параметров.
4. Формирование комплекса задач моделирования и их сведения к типовым математическим постановкам в форме соответствующих задач математической физики.
5. Определение и задание количественных параметров граничных условий: границы областей с разными типами воздействий, объемные и плоские источники энергии, взаимодействие с окружающей средой и конструкциями более высокого уровня иерархии (например, определение коэффициентов теплообмена) и т. д.
6. Задание параметров, входящих в граничные условия, непосредственно на 3D-модели конструкции.
7. Проведение расчетов и анализ результатов.

При этом основным этапом, определяющим адекватность и точность результатов моделирования, является выбор класса решаемой задачи, определяемого видом базового дифференциального уравнения (Лапласа, Пуассона, Фурье и т. д.), формирование и задание граничных условий для 3D-модели конструкции. Поэтому целесообразным представляется формирование комплекса постановок задач моделирования для всех основных видов анализа и определения типовых характеристик РЭС, наиболее широко применяемых конструкций (с учетом

их иерархии) и внешних воздействий. И создание для каждой из таких моделей частных методик и их реализации средствами Creo.

Ниже приведена последовательность создания модели ЭРЭ на примере микросхемы, выпускаемой в корпусе DIP24:

1. Создание моделей компонентов, составляющих ЭРЭ (корпуса, выводы, теплоотводы и т.д.

2. Добавление свойств материалов к моделям (плотность, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, коэффициент термального расширения, удельная теплоемкость, теплопроводность).

3. Создание сборки модели электрорадиоэлемента.

4. Добавление тепловых свойств к модели (рассеиваемая мощность и т.п.

Высокая точность построенных 3D-моделей, по отношению к реальным элементам, дает возможность контролировать влияние механических воздействий на всю конструкцию в целом, включая собственные частоты элементов и их выводов, что немаловажно для проектирования конструкций, подверженных интенсивным механическим воздействиям.

Если необходимо уменьшить время процесса моделирования, достаточно упростить модели электрорадиоэлементов, заменив их на простые геометрические фигуры: параллелепипеды, тетраэдры, цилиндры и т.п. Но это, в свое время, приведет к некоторой погрешности в результатах моделирования, в том числе отсутствует возможность контроля механических воздействий на элементы. Данное упрощение конструкции удобно при анализе тепловых процессов, проходящих при работе радиоэлектронного модуля и при отсутствии интенсивных механических нагрузок.

5. Проведение процесса моделирования механических и тепловых воздействий на основе разработанных методик.

Как было отмечено выше, для моделирования механических и температурных воздействий на РЭС в программном комплексе Creo используется Creo Simulate. При помощи данного приложения можно производить большое количество различных анализов, вот некоторые из них:

- статический;
- модальный;
- анализ на устойчивость;
- анализ на усталость;
- преднапряженный;
- динамический переходный;
- динамический частотный;
- динамическое воздействие;
- случайные воздействия;
- стационарный тепловой анализ;
- нестационарный тепловой.

В следующем параграфе будет рассмотрена методика проведения статического, модального и стационарно теплового анализов в программном модуле Creo Simulate.

10. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

В данном пункте приведены примеры проведения статического, модального и стационарно теплового анализов в системе Creo Simulate. Опираясь на приведенные примеры, необходимо самостоятельно провести выше описанные анализы, начальные данные для практических работ находятся в приложении.

10.1. СТАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Статический анализ – это анализ, который позволяет определить перемещения, напряжения, деформации и т.п., дефект в конструкции РЭС, при возникновении внешних нагрузок, которые, в свою очередь, не сопровождаются процессами рассеивания энергии или появлением существенных инерционных эффектов.

Для проведения статического анализа необходимо открыть приложение Creo Simulate (рис. 10.1), после загрузки программы нажать клавишу **Открыть**  и выбрать модель, необходимую для исследований. После загрузки модели перейти в **Структурный режим** .

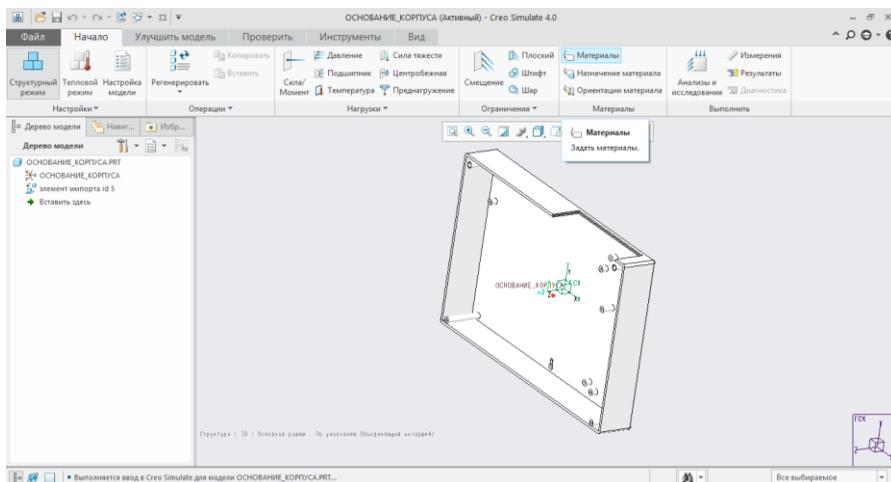
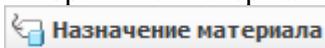


Рис. 10.1. Главное окно Creo Simulate

Далее необходимо выбрать материал для исследуемой модели, для этого нажимаем на кнопку **Материалы** , в открывшемся окне можно выбрать из стандартных материалов, имеющих в библиотеках, или же задать полностью новый материал. Выбранные материалы должны оказаться в окне **Материалы в модели** (рис. 10.2).

После этого нужно назначить выбранные материалы, для этого необходимо нажать кнопку **Назначение материала** , в открывшемся окне назначить выбранные ранее материалы (рис. 10.3). Если модель представляет из себя сборочную конструкцию, то для каждого компонента модели можно назначить свой материал.

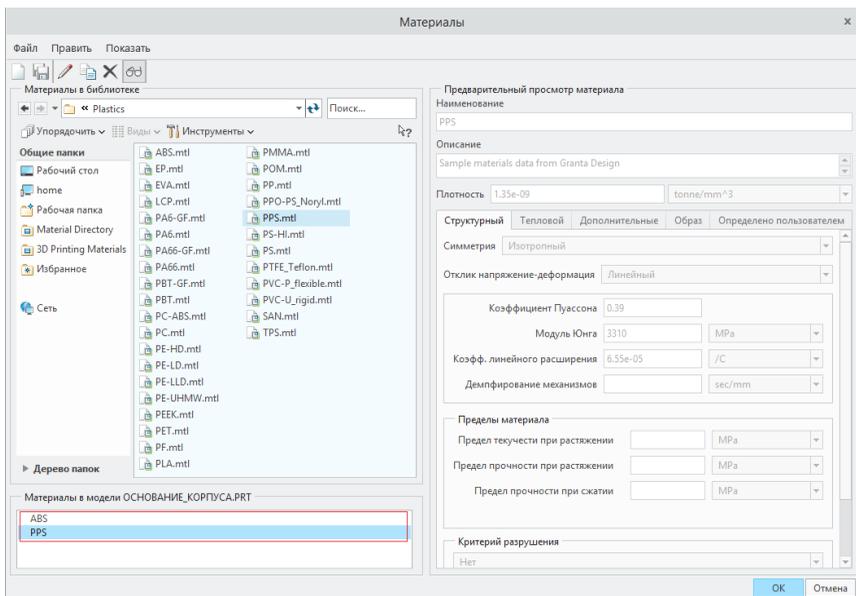


Рис. 10.2. Окно «Материалы»

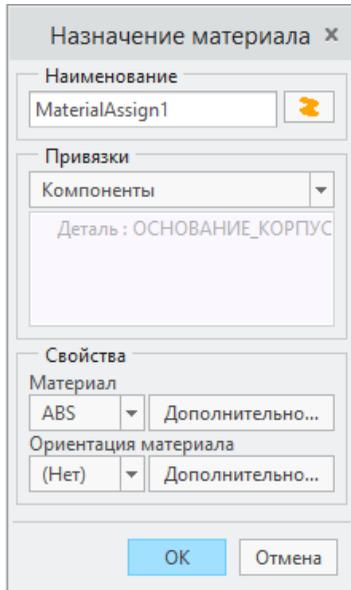


Рис. 10.3. Окно «Назначение материала»

После назначения материала можно перейти к закреплению модели, для этого необходимо нажать на кнопку **Смешение** . В открывшемся окне установить геометрические привязки, как показано на рис. 10.4 и 10.5.

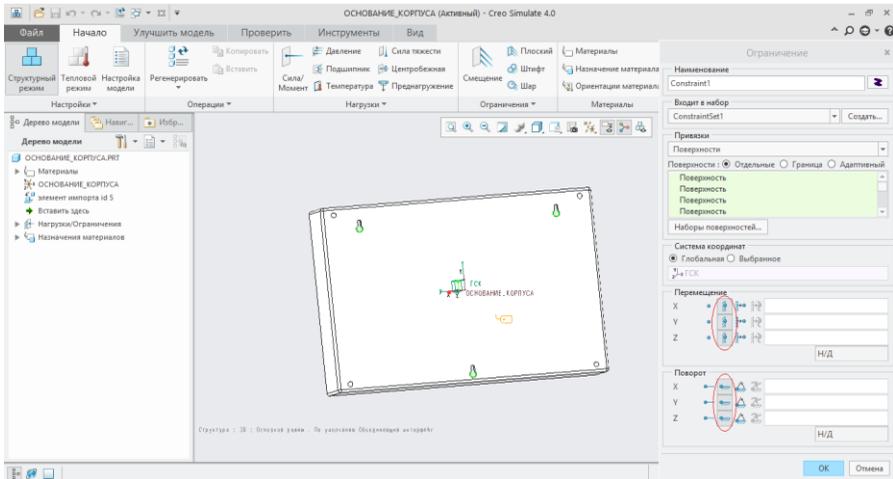


Рис. 10.4. Окно «Смешение»

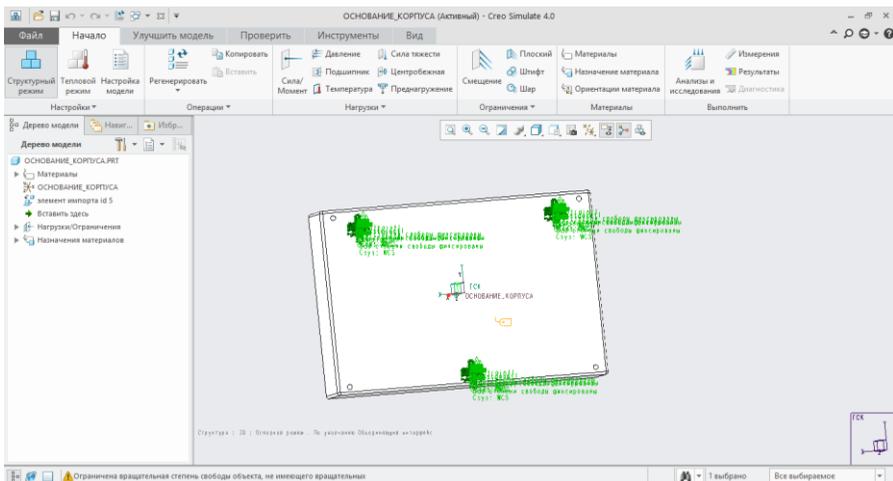


Рис. 10.5. Места закрепления модели

Следующим шагом будет задание нагрузки на модель, в примере это будет сила тяжести, для этого необходимо нажать на кнопку **Сила тяжести**  и в появившемся окне прописать ускорение свободного падения по координате У и выбрать систему исчисления в m/c^2 (рис. 10.6).

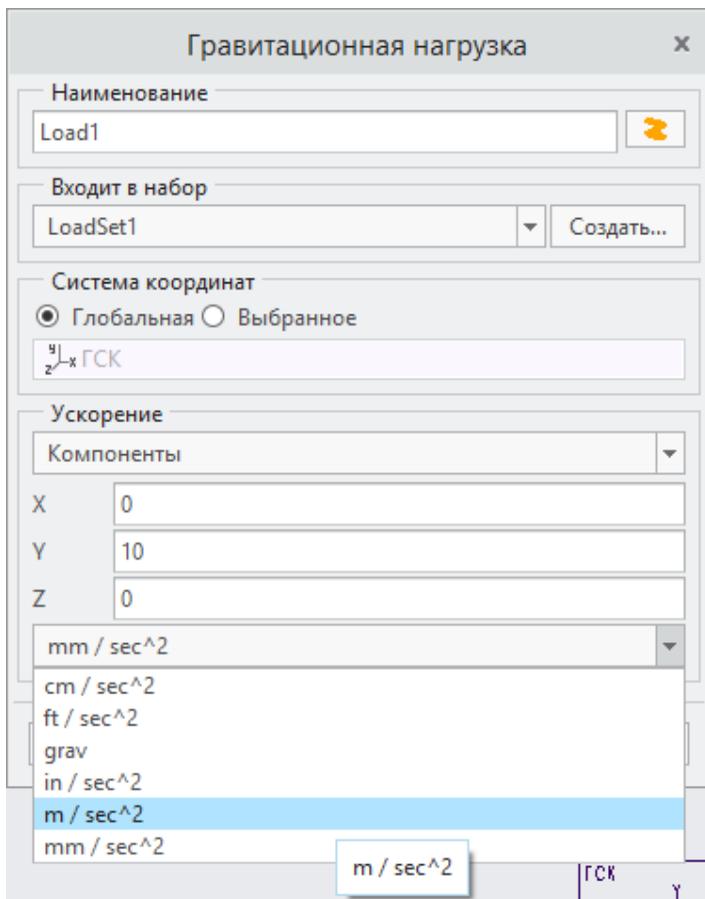
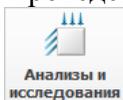


Рис. 10.6. Окно «Сила тяжести»

После проведения всех подготовительных работ можно перейти непосредственно к проведению анализа, для этого



нужно нажать на кнопку **Новый статический** (рис. 10.7).

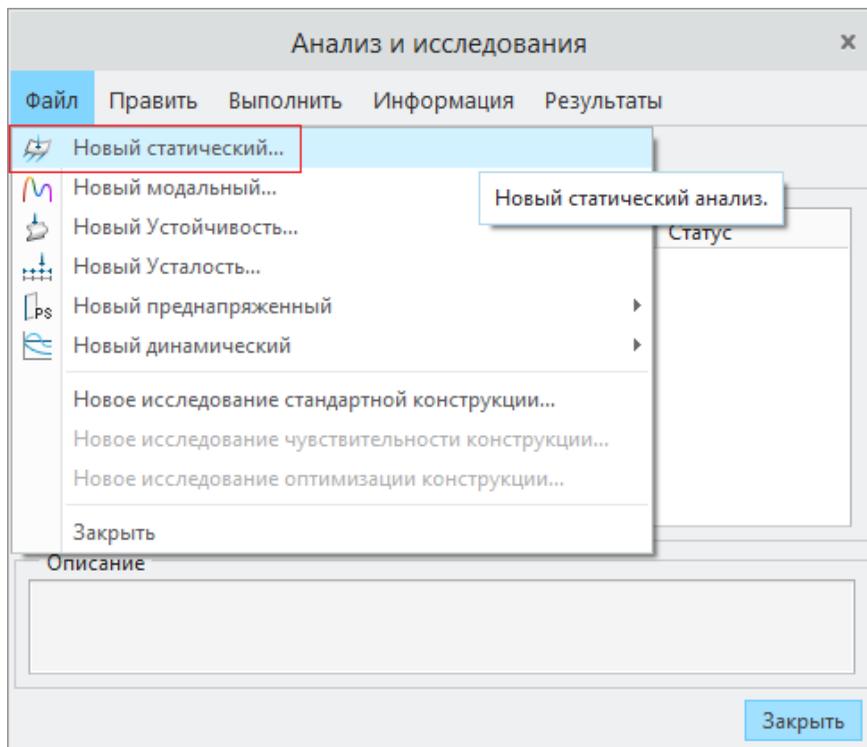


Рис. 10.7. Окно «Анализ и исследования»

Далее во вкладке **Сходимость** можно задать метод проведения анализа (рис. 10.8), во вкладке **Выводы** можно выбрать, что будет показано на модели в конечном результате (рис. 10.9), в последней вкладке можно добавить в исключения для анализа некоторые элементы модели (рис. 10.10).

Описание

Нелинейный / Использовать истории нагружения Освобождение инерции

Ограничения

Комбинировать наборы ограничений

Набор ограничений/компонент

ConstraintSet1 / ОСНОВАНИЕ_КОРПУСА

Нагрузки

Суммировать наборы нагрузок

Набор нагрузок / Компонент

LoadSet1 / ОСНОВАНИЕ_КОРПУСА

Сходимость Вывод Исключенные элементы

Метод

Однопроходная адаптация

Многопроходная адаптация

Однопроходная адаптация

Быстрая проверка

Максимальное изначальное взаимопроникновение

Подробно вычислить напряжения в контактных интерфейсах

Расширенное управление...

Рис. 10.8. Вкладка «Сходимость»

Описание

Нелинейный / Использовать истории нагружения Освобождение инерции

Ограничения

Комбинировать наборы ограничений

Набор ограничений/компонент

ConstraintSet1 / ОСНОВАНИЕ_КОРПУСА

Нагрузки

Суммировать наборы нагрузок

Набор нагрузок / Компонент

LoadSet1 / ОСНОВАНИЕ_КОРПУСА

Сходимость **Вывод** Исключенные элементы

Вычислить

Напряжения

Повороты

Реакции

Погрешности локального напряжения

График

Сетка отображения ▲▼

Рис. 10.9. Вкладка «Вывод»

Свойства

Нелинейный / Использовать истории нагружения Освобождение инерции

Ограничения

Комбинировать наборы ограничений

Набор ограничений/компонент

ConstraintSet1 / ОСНОВАНИЕ_КОРПУСА

Нагрузки

Суммировать наборы нагрузок

Набор нагрузок / Компонент

LoadSet1 / ОСНОВАНИЕ_КОРПУСА

Сходимость Вывод **Исключенные элементы**

Исключить элементы

Игнорировать для нормализованных ошибок напряжений

Игнорировать

Напряжения

Напряжения и смещения

Предел

Степень полинома 6

Рис. 10.10. Вкладка «Исключенные элементы»

После нажатия **ОК** анализ будет добавлен в окно, и для его расчета необходимо нажать клавишу **Начать выполнение** , после завершения анализа напротив него появится зеленая галочка (рис. 10.11).

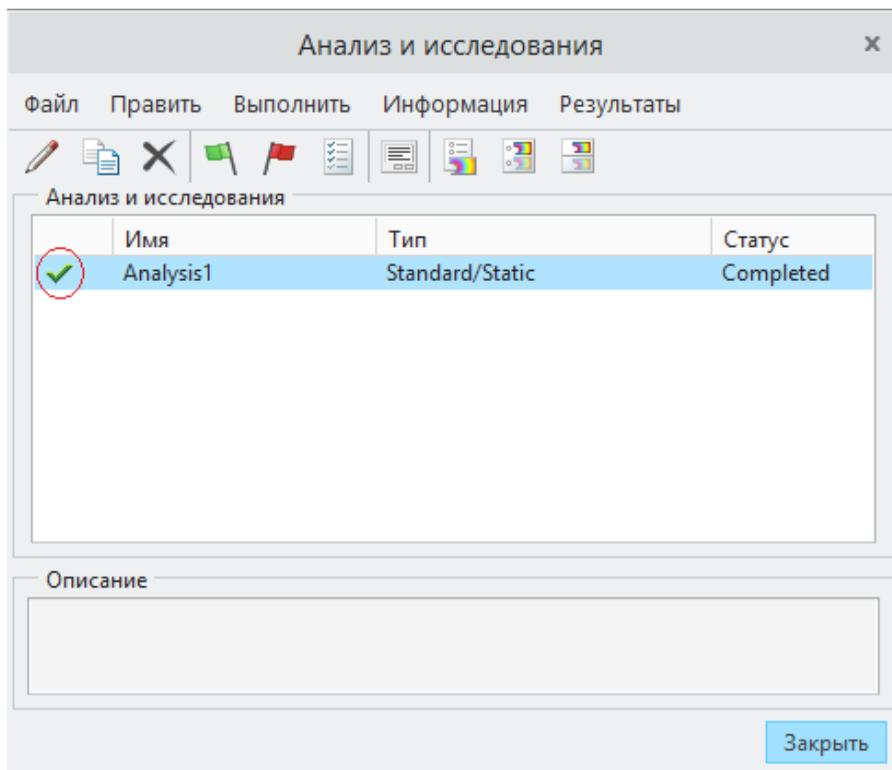


Рис. 10.11. Анализ выполнен

Теперь можно посмотреть результаты проведенного анализа, для этого нужно нажать на клавишу **Проверка результатов исследования конструкции и конечно-элементного анализа** , в появившемся окне можно выбрать вид показываемых нагрузок, после чего нажимаем **ОК** и **показать** (рис. 10.12).

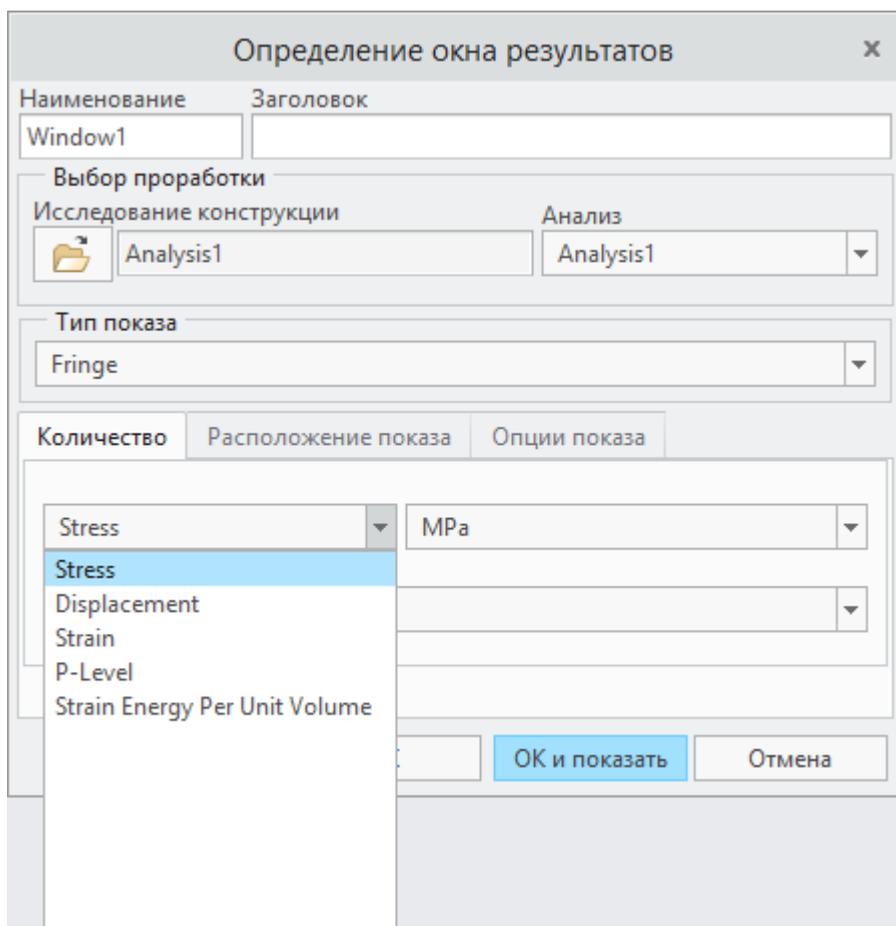


Рис. 10.12. Определение окна результатов

В появившемся окне можно рассмотреть промоделированную модель и определить, в каких местах находится наибольшая нагрузка. В левом верхнем углу можно выбрать разные напряжения для отображения на модели. Также,

используя кнопку **Динамический запрос** , можно определить напряжения в определенном месте модели (рис. 10.13).

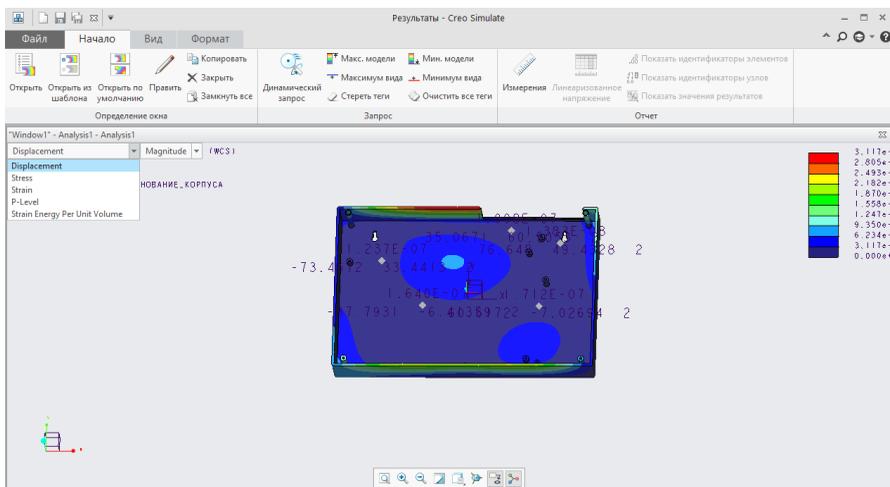


Рис. 10.13. Результаты анализа

10.2. МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Модальный анализ иногда называется анализом собственной частоты. Модальный анализ важен для моделей, которые подвергнуты циклическим или вибрационным нагрузкам. Этот тип анализа сообщает о собственных частотах и соответствующих главных собственных формах системы при оценке. Модальный анализ проводился в интервалах частот от 100 Гц до 2000 Гц и от 20 кГц до 24 кГц.

Как и статический анализ, модальный анализ начинается с открытия приложения Creo Simulate, после загрузки программы нужно нажать клавишу **Открыть**  и выбрать модель, необходимую для исследований. После загрузки модели перейти в **Структурный режим** .

Далее выбирается материал для исследуемой модели, для этого производится переход во вкладку , в открывшемся окне можно выбрать из стандартных материалов, имеющих в библиотеках, или же задать полностью новый материал. Выбранные материалы должны оказаться в окне **Материалы в модели** (рис. 10.14).

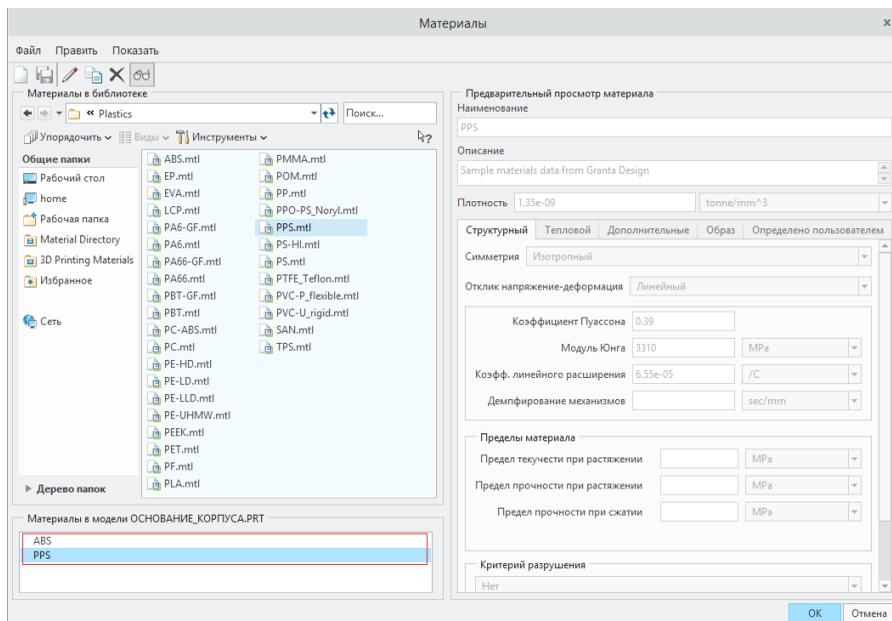


Рис. 10.14. Выбор материалов

После этого необходимо назначить выбранные материалы для исследуемой модели, для этого нужно нажать на кнопку , в открывшемся окне назначить выбранные ранее материалы (рис. 10.15).

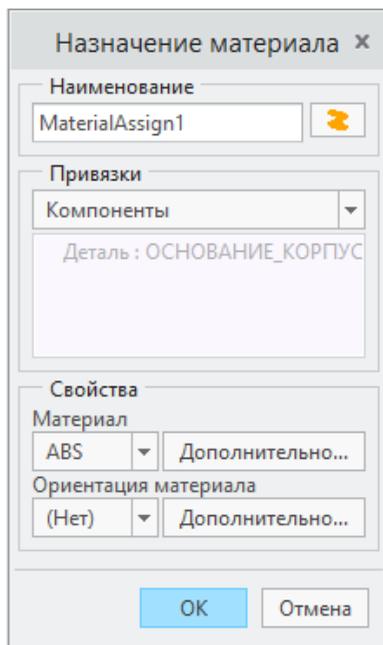


Рис. 10.15. Назначение материала

Обычно любой структурный анализ предполагает предварительное закрепление модели, однако в случае модального анализа незакрепленная модель удобна в качестве отладочной. Данная особенность очень полезна при проектировании балочных и оболочечных моделей, где могут быть проблемы обеспечения связности. В связи с этим в данном примере модель не будет закреплена.

После того как модель была подготовлена, можно перейти непосредственно к проведению анализа, для этого



необходимо нажать на кнопку **Анализ и исследование**, в открывшемся окне выбрать **Новый модальный** (рис. 10.16).

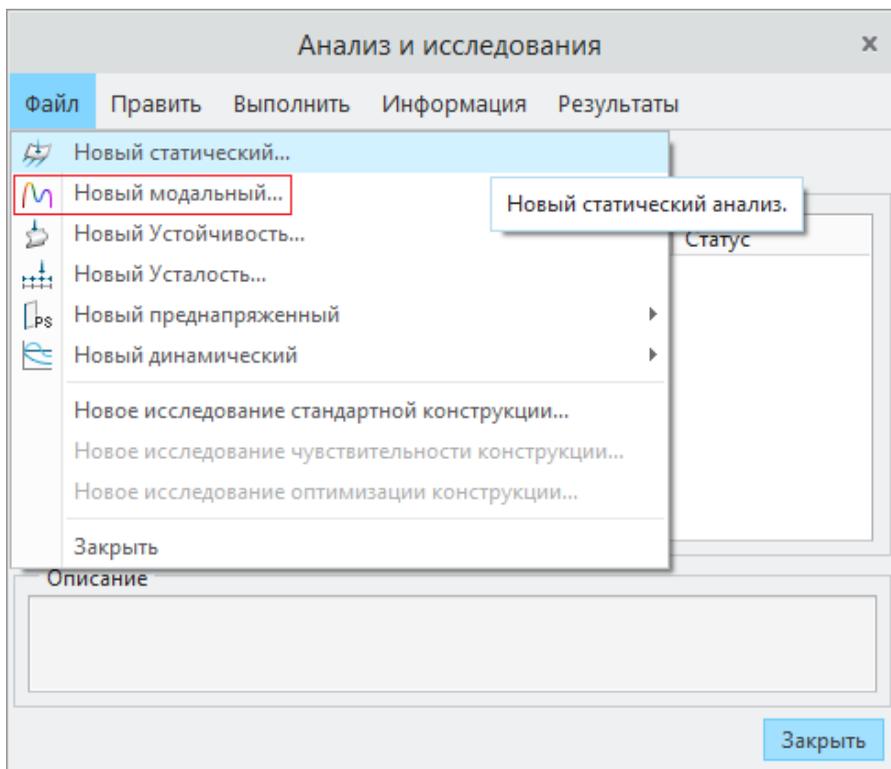


Рис. 10.16. Окно «Анализ и исследования»

В открывшемся окне, во вкладке **Режимы**, можно выбрать число форм колебаний или же задать максимальную и минимальную частоты (рис. 10.17), во вкладке **Сходимость** можно задать метод проведения анализа (рис. 10.18), во вкладке **Выводы** можно выбрать, что будет показано на модели в конечном результате (рис. 10.19), в последней вкладке можно добавить в исключения для анализа некоторые элементы модели (рис. 10.20).

Определение модального анализа x

Наименование
Analysis2

Описание

Ограничения

Комбинировать наборы ограничений

Наименование	Компонент
ConstraintSet1	ОСНОВАНИЕ_КОРПУСА

Закрепленный
 Незакрепленный
 С поиском жестких форм

Режимы **Распределение температуры** **Вывод** **Сходимость** **Исключенные элементы**

Режимы

Число форм колебаний
 Все формы в диапазоне частот

Число форм колебаний	4
Минимальная частота	0
Максимальная частота	0

Рис. 10.17. Вкладка «Режимы»

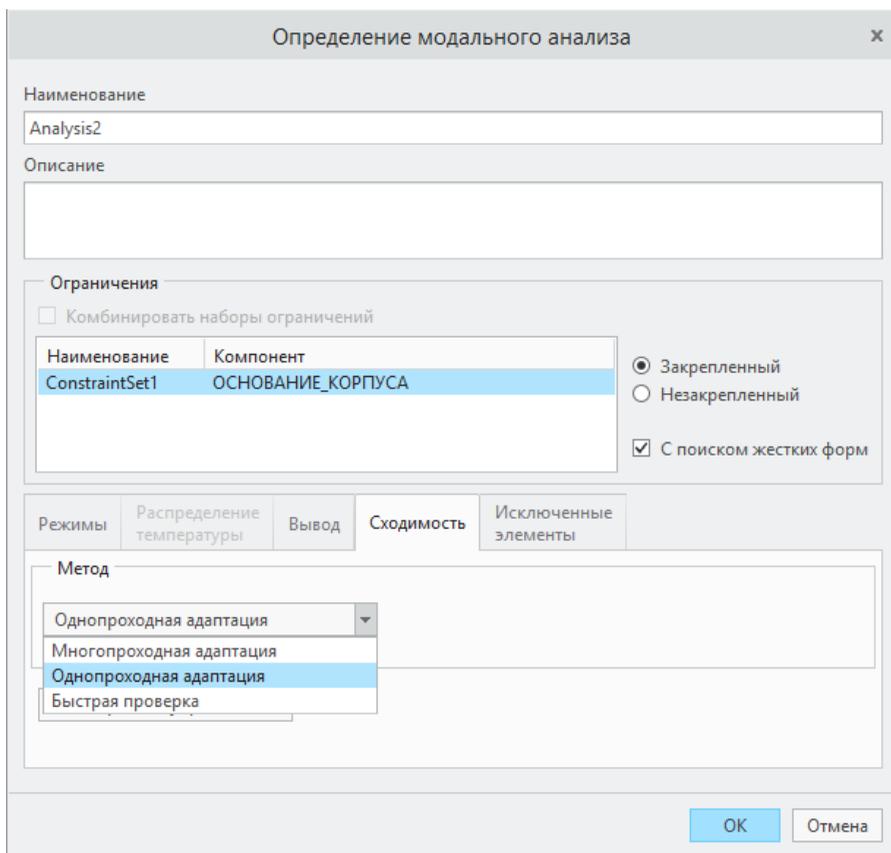


Рис. 10.18. Вкладка «Сходимость»

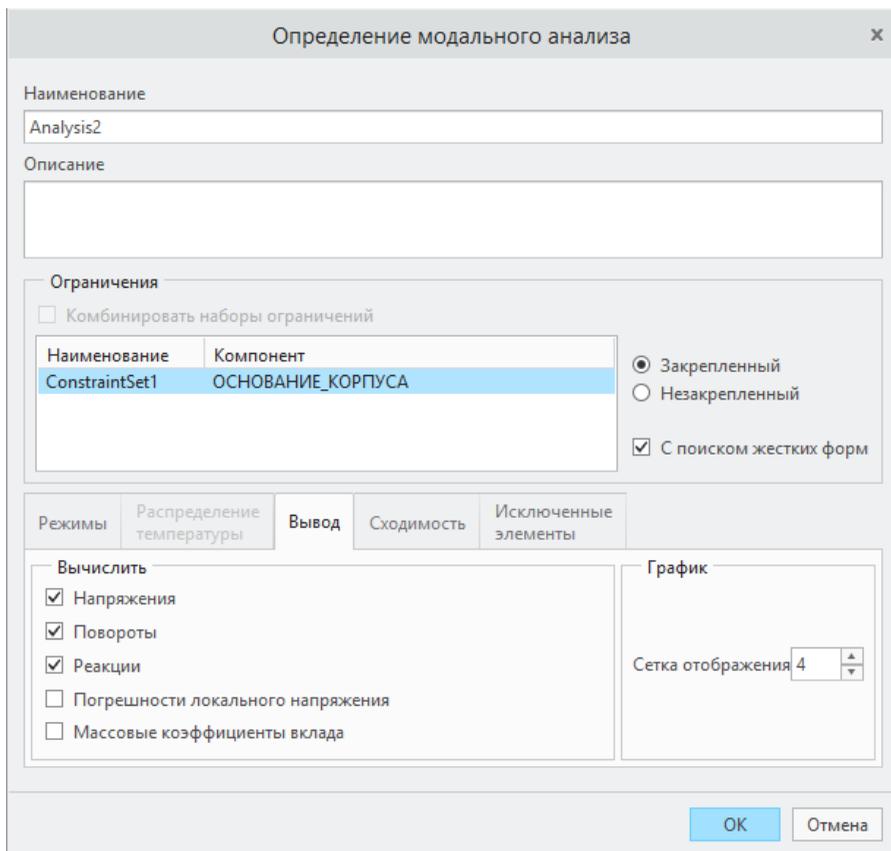


Рис. 10.19. Вкладка «Вывод»

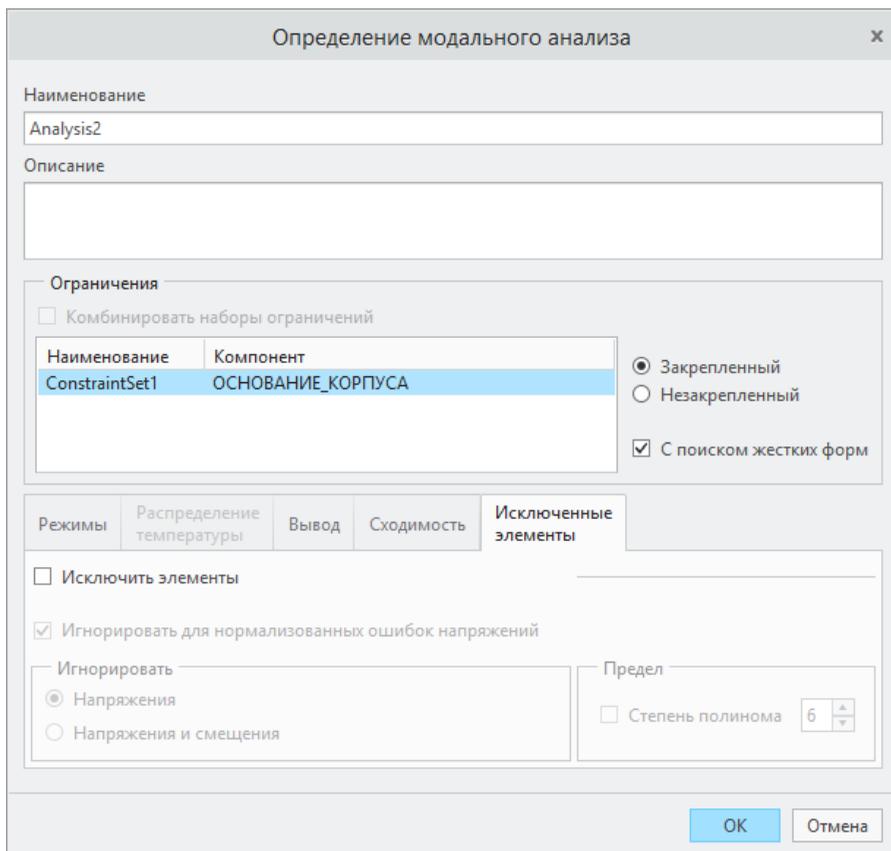


Рис. 10.20. Вкладка «Исключенные элементы»

После нажатия **ОК** анализ будет добавлен в окно и для его расчета необходимо нажать клавишу **Начать выполнение** , после завершения анализа напротив него появится зеленая галочка (рис. 10.21).

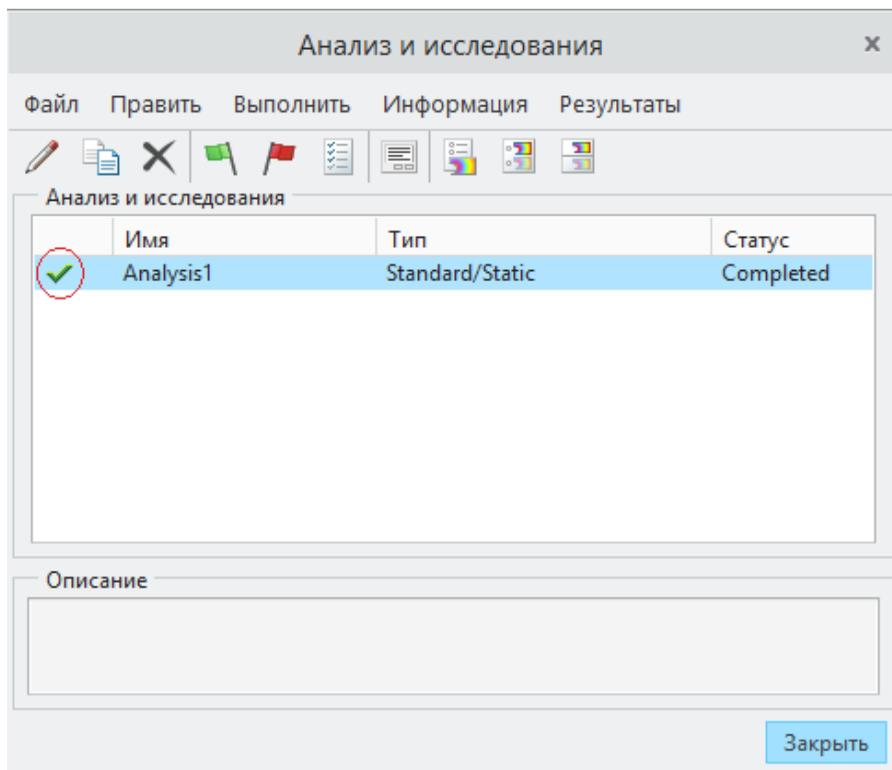


Рис. 10.21. Анализ выполнен

Теперь можно посмотреть результаты проведенного анализа, для этого необходимо нажать на клавишу **Проверка результатов исследования конструкции и конечно-элементного анализа** , в появившемся окне можно выбрать необходимые частоты, после чего нажать **ОК и показать** (рис. 10.22).

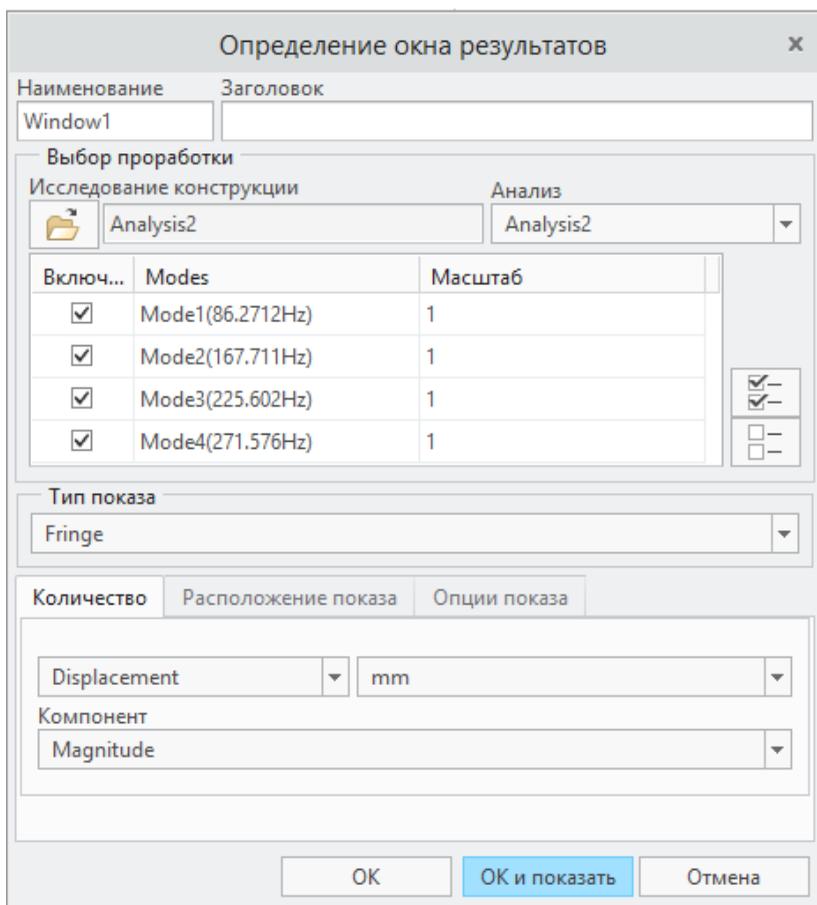


Рис. 10.22. Определение окна результатов

В появившемся окне можно рассмотреть промоделированную модель и определить, в каких местах находится наибольшая нагрузка. В левом верхнем углу, как и в случае статического анализа, можно выбрать разные напряжения для отображения на модели. Также, используя кнопку **Динами-**

ческий запрос



, можно определить напряжения в определенном месте модели (рис. 10.23).

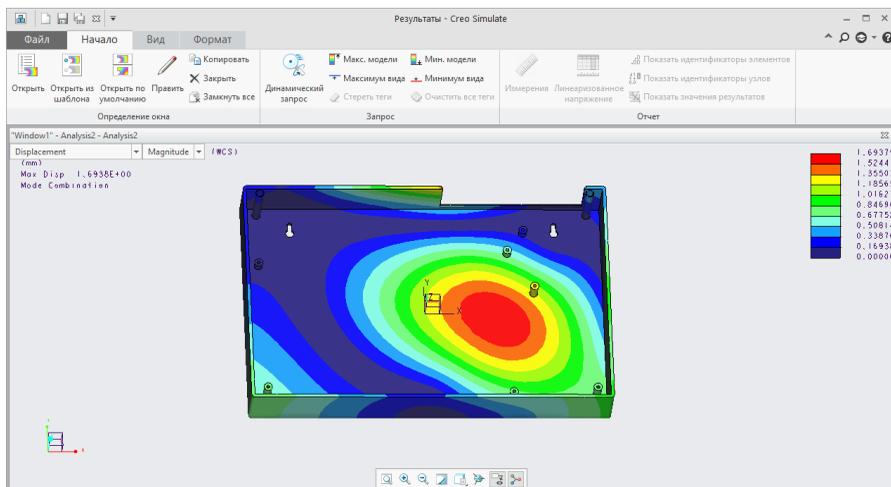


Рис. 10.23. Результаты анализа

10.3. СТАЦИОНАРНЫЙ ТЕПЛОВОЙ АНАЛИЗ

Стационарный тепловой анализ может быть использован для вычисления теплового отклика на тепловые нагрузки в зависимости от заданной температуры, примененных условий конвекции или же при воздействии обоих этих факторов. При данном анализе не происходит исследования динамических изменений тепловых нагрузок и граничных условий.

Как и в предыдущих анализах, стационарный тепловой анализ начинается с открытия приложения Creo Simulate, после

загрузки программы нужно нажать клавишу **Открыть**  и выбрать модель, необходимую для исследований. Но после загрузки модели, в отличие от прошлых анализов,

надо перейти в **Тепловой режим** .

Далее происходит выбор материала для исследуемой модели, для этого нажимаем на кнопку , в открывшемся окне можно выбрать из стандартных материалов, имеющихся в библиотеках, или же задать полностью новый материал.

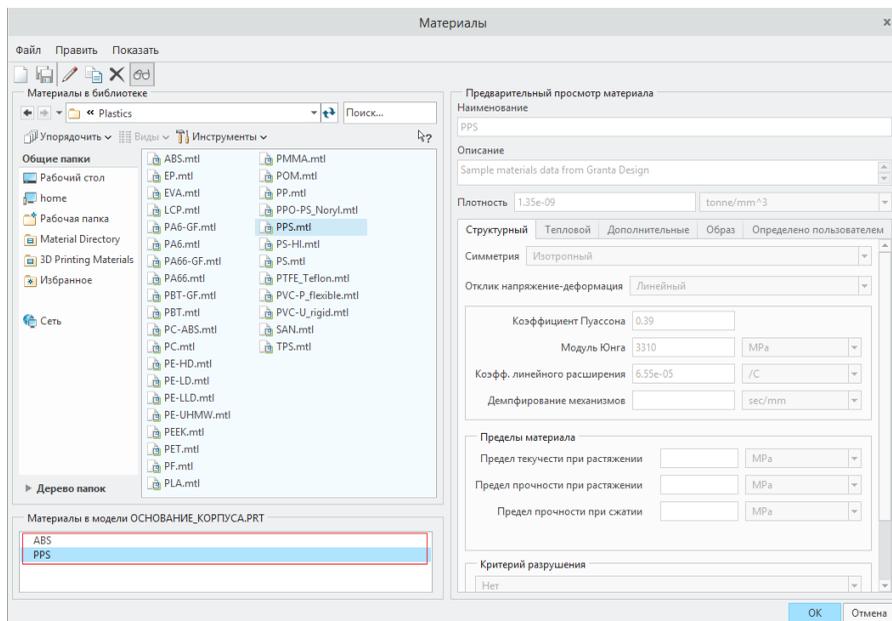


Рис. 10.24. Окно выбора материалов

После этого необходимо назначить выбранные материалы, для этой цели переходим в , в открывшемся окне назначить выбранные ранее материалы. Если модель представляет из себя сборочную конструкцию, то для каждого компонента модели можно назначить свой материал (рис. 10.25).

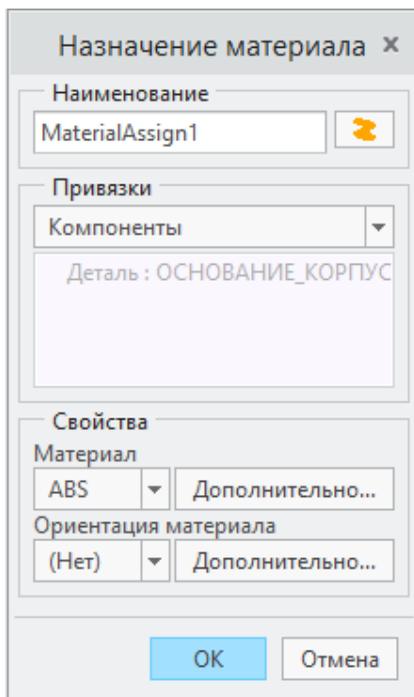


Рис. 10.25. Способ назначения материала

Следующим шагом будет задание тепловой нагрузки.

Для этого нужно перейти во вкладку **Теплота** . В открывшемся окне прописывается значение нагрузки и выбираются единицы измерения в Вт. На самой модели необходимо выбирать поверхности, откуда излучается тепловая энергия. Если приборов на исследуемой конструкции, от которых рассеивается тепло, несколько, то для каждого из них отдельно нужно задать тепловую нагрузку (рис. 10.26).

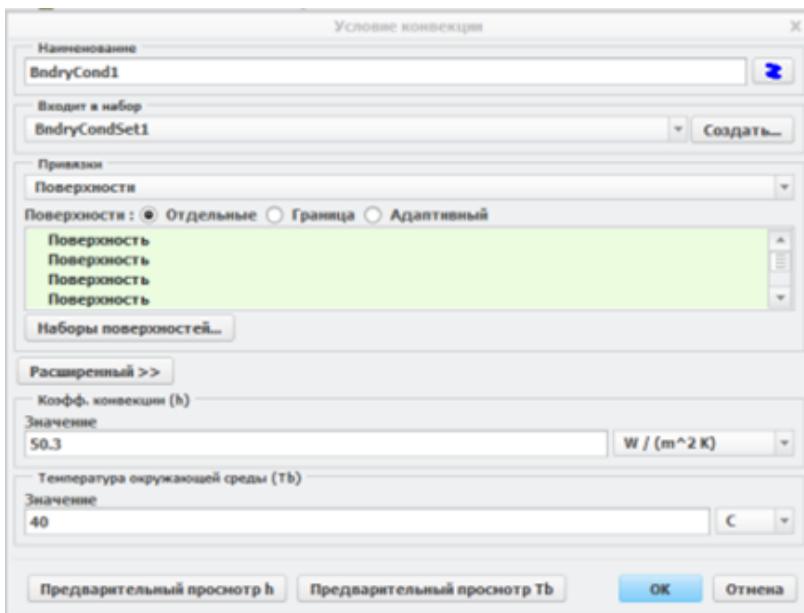


Рис. 10.27. Окно «Условие конвекции»

После проведения всех подготовительных работ можно переходить непосредственно к самому анализу, для этого

нужно нажать на кнопку **Анализы и исследования** . В появившемся диалоговом окне нажать на **Настройка параметров**

выполнения , где необходимо выделить для расчета побольше оперативной памяти (предпочтительнее задавать не меньше 4000 Гб ОЗУ). После этого выполняется команда меню **Файл > Новый стационарный тепловой**. В открывшемся окне все необходимые ограничения и наборы нагрузок должны быть уже выбраны автоматически (рис. 10.28).

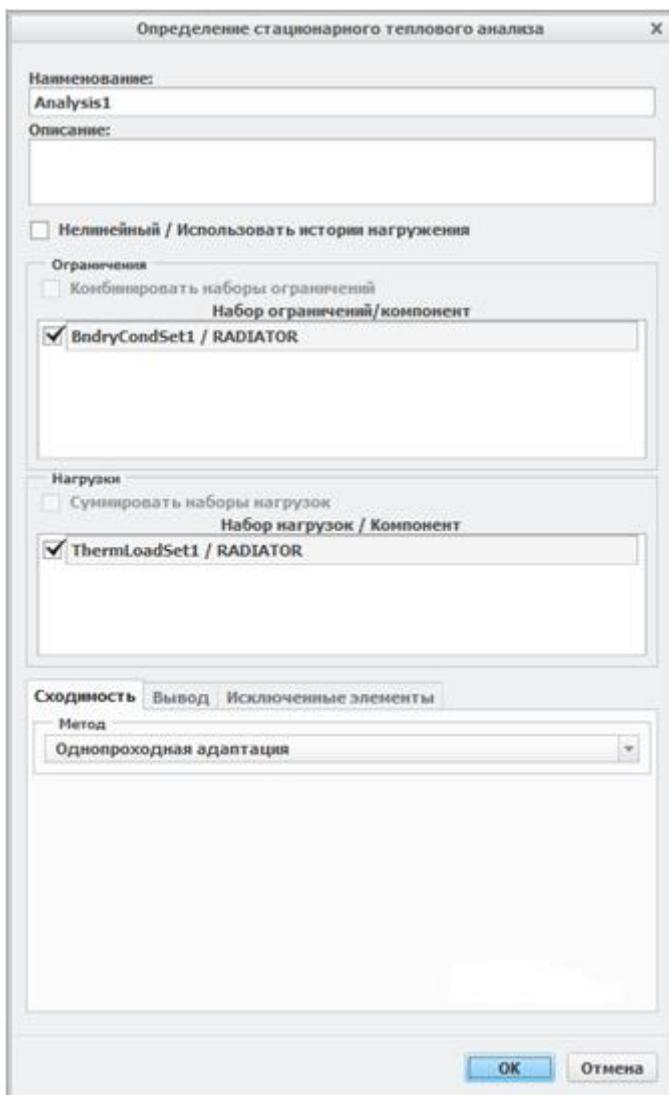


Рис. 10.28. Определение стационарного теплового анализа

После выполнения всех установок в окне **Анализы** и исследования можно нажать **Начать выполнение** . Для просмотра хода выполнения работы можно использовать команду **Показать состояние исследования**  и отслеживать каждый этап выполнения расчета. Для ускорения расчета можно было бы упростить модель — убрать лишние отверстия на радиаторе, в подложке прибора, убрать скругления, фаски и т. д.

После завершения моделирования можно посмотреть результаты проведенного анализа, для этого необходимо нажать на клавишу **Проверка результатов исследования конструкции и конечно-элементного анализа** , в появившемся окне можно выбрать, каким образом будет представлена исследуемая модель (рис. 10.29).

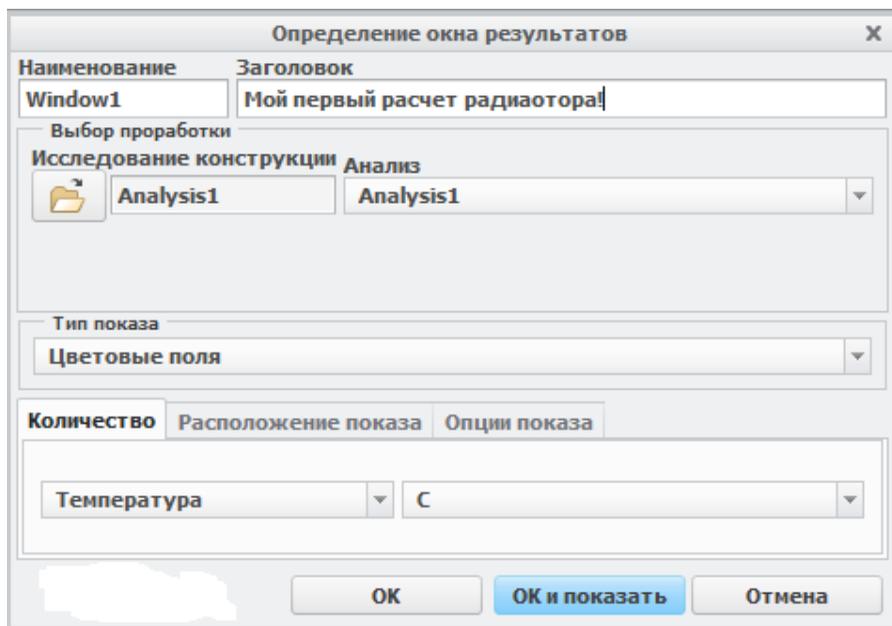


Рис. 10.29. Определение окна результатов

Как и в предыдущих анализах, при просмотре полученных результатов можно рассмотреть промоделированную модель и определить, в каких местах находится наибольшая нагрузка, в данном случае температура. В левом верхнем углу можно выбрать разные виды представления результатов.



Также, используя кнопку **Динамический запрос**, можно определить конкретную температуру в конкретной точке исследуемой модели.

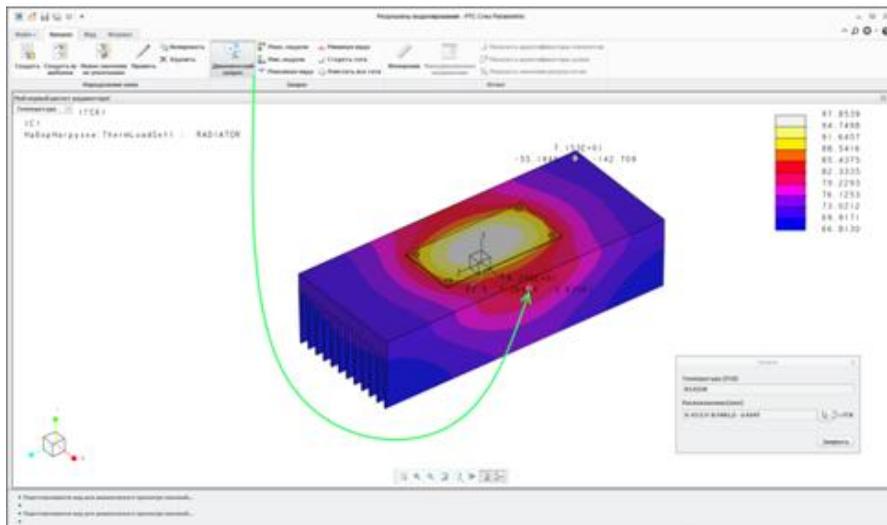


Рис. 10.30. Результаты анализа

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определение технического состояния электронных систем реализуется при диагностике, испытании и контроле параметров.

Основным требованием, предъявляемым к современной РЭС, является пригодность использования её по назначению в заданных условиях. Совокупность свойств, определяющих степень пригодности, характеризуется качеством. Составной частью качества является надежность, в понятие которой включается некоторая часть свойств, определяющих качество.

Обеспечение высокой надежности РЭС требует знания и анализа факторов, от которых она зависит. При этом следует исследовать переходные процессы как в элементах, узлах, блоках, так и в системе в целом на всех стадиях производства и эксплуатации электронного средства. Источниками необходимых сведений для определения надежности является автоматизация диагностики, испытаний и контроля РЭС на этапах проектирования и эксплуатации. Использование автоматизации при указанных способах апробирования электронных устройств способствует повышению достоверности полученных результатов, так как «вмешательство» субъективного фактора в технологический процесс производства минимально.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Биргер И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.
2. Давыдов П. С. Техническая диагностика / П. С. Давыдов. – М.: Радио и связь, 1988. – 256 с.
3. Байда Н. П. Самообучающиеся анализаторы производственных дефектов РЭА / Н. П. Байда, В. И. Месюра, А. М. Роик. – М.: Радио и связь, 1991. – 256 с.
4. Испытания радиоэлектронной, электронно-вычислительной аппаратуры и испытательное оборудование: учеб. пособие для вузов / О. П. Глудкин и др.; под ред. А. И. Коробова. – М.: Радио и связь, 1987. – 272 с.
5. Никитин Л. Н. Виртуальные методы испытаний: лабораторный практикум: учеб. пособие / Л. Н. Никитин, И. А. Лозовой. – Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2011. – 93 с.
6. Никитин Л. Н. Испытания, контроль и диагностика приборов и электронных средств: учеб. пособие [Электронный ресурс] / Л. Н. Никитин, А. Н. Лукин, В. Н. Семенов. – Электронные данные. – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2017. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM): ил.; 12 см.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Номер \ Параметры	Плотность, $T/мм^3 \cdot 10^{-9}$	Кэф. Пуас.	Мод. Юнга, $H/мм^2$	КЛР, $1/C_2 \cdot 10^{-5}$	$C_2, мм^2/с^2 \cdot ^\circ C \cdot 10^9$	Тепло-пров. $H/c \cdot C$
1) ASA-пластик WR-9100	1,08E	0,12	2300	13,6	0,84	0,233
2) ASA-пластик WR-9120	1,07E	0,101	1000	12	0,86	0,57
3) ASA-пластик WR-9160	1,08E	0,15	1900	9	0,85	0,44
4) ASA-пластик WR-9730	1,08E	0,09	1200	8,7	0,91	0,66
5) АБС-ОМ-2020-30	1,04E	0,14	2150	14,5	0,88	0,47
6) АБС-пластик 0809-30	1,05E	0,089	1670	20,1	0,86	1,2
7) АБС-пластик 0809M	1,1E	0,12	1450	15,6	0,90	0,95
8) Фторопласт Ф-4	1,12E	0,14	2900	9,11	0,92	0,84
9) Фторопласт Ф-4 К20	1,9E	0,17	2450	12,3	0,96	1,08
10) Фторопласт Ф-4 К15M5	2,05E	0,21	2100	11,5	0,89	0,76
11) Ф-4 С15	2,4E	0,109	2220	13,6	0,92	0,77
12) Ф-4 С15M5	3,08E	0,14	1935	13,8	0,94	0,77

Окончание приложения

13) Ф-4 К15УВ5	2,6E	0,209	1850	15,6	0,91	0,63
14) Ф-4 КС2	2,08E	0,192	1840	20,9	0,89	0,89
15) АН-10	1,08E	0,132	1934	31,7	0,87	0,45
16) АН-17	2,4E	0,17	1565	32,9	0,84	0,52
17) КВ-300	2,8E	0,131	1886	17	0,88	0,36
18) АБС-пластик SD-0160	2,55E	0,154	1600	15	0,89	0,55
19) АБС-пластик SD-0170	2,5E	0,16	2517	16	0,90	0,398
20) АБС-пластик HG-0760GP	3,1E	0,12	2300	10,2	0,83	0,44

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ. ОПРЕДЕЛЕНИЯ. ПРОСТЫЕ И СЛОЖНЫЕ ПРИЗНАКИ	4
1.1. Диагностические веса признаков	5
1.2. Связь ДВ реализаций простого признака	6
1.3. Условный и независимый ДВ	7
1.4. Диагностический вес реализации комплекса признаков	8
1.5. ДЦО	8
1.6. ДЦО для простого признака	9
1.7. Выбор величины диагностических интервалов	10
1.8. Общая ДЦО	10
1.9. ДЦО по комплексу признаков	11
1.10. ДЦО при последовательном проведении исследования ..	13
2. ПОКАЗАТЕЛИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ. ДОСТОВЕРНОСТЬ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И ЕЁ РАСЧЁТ	17
2.1. Показатели диагностирования.....	17
2.2. Расчет параметров диагностирования	19
2.3. Ошибки в тракте диагностирования. Методика их расчета	20
2.4. Достоверность диагностирования.....	24
3. АЛГОРИТМЫ ПОИСКА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ДЕФЕКТОВ. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАДИОЭЛЕМЕНТОВ	28
3.1. Математические модели узлов РЭА как объектов диагностирования	28
3.2. Графовые модели для поиска производственных дефектов.....	31
3.3. Алгоритмы идентификации обрывов, коротких замыканий и дефектов ориентации ЭРЭ	32
3.4. Метод идентификации дефектов ориентации ЭРЭ	35

3.5. Идентификация видов дефектов электрорадиоэлементов.	37
3.6. Метод электрического разделения сложных электрических цепей на двухполюсные цепи	43
3.7. Методы раздельного преобразования составляющих двухполюсных электрических цепей	47
3.8. Автоматическая коррекция погрешностей преобразования	55
3.9. Обеспечение контролепригодности электронных устройств	60
4. СИСТЕМЫ ТЕХНИКО-ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ И УСТРОЙСТВА СОПРЯЖЕНИЯ	62
4.1. Система технико-диагностического контроля радиоэлектронных средств	62
4.2. Классификация систем технико-диагностического контроля	63
4.3. Структура систем ТДК	65
4.4. Информационные характеристики и алгоритмы технико-диагностического контроля	66
4.5. Особенности технико-диагностического контроля радиоэлектронных средств	68
4.6. Характеристики систем ТДК	69
4.7. Устройства сопряжения с объектом	71
4.8. Надежные контактные устройства игольчатого типа	75
4.9. Контактные устройства для печатных узлов с поверхностным монтажом	78
4.10. Электронные коммутаторы	81
4.11. Бесконтактные устройства сопряжения	84
4.12. СРТД и контроля радиоэлектронных средств	86
5. АЛГОРИТМЫ САМООБУЧЕНИЯ, ОЦЕНКА И КОНТРОЛЬ СИСТЕМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ	93
5.1. Адаптивные СТДК	94
5.2. Программа автоматического поиска дефектов	97
5.3. Адаптация системы к объекту диагностирования	101
5.4. Показатели эффективности	105

5.5. Расчет коэффициента качества и эффективности	107
5.6. Исследование эффективности диагностирования на универсальных вероятностных моделях	109
6. АВТОМАТИЗАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ	111
6.1. Автоматизированная система испытания и контроля РЭА.....	111
6.2. Требования к обеспечению автоматизированной системы контроля	124
6.3. Техническое обеспечение	126
6.4. Математическое обеспечение.....	134
6.5. Программное обеспечение.....	140
6.6. Информационное обеспечение.....	143
6.7. Лингвистическое обеспечение	145
7. МЕТОДЫ ВИРТУАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭС НА МЕХАНИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ	146
7.1. Блок построения расчетной модели.....	148
7.2. Блок проведения численных экспериментов	162
7.3. Блок анализа результатов вычисления	166
8. МЕТОДЫ ВИРТУАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭС ПРИ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗКАХ	169
9. ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА CREO ДЛЯ АНАЛИЗА МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЭМ	178
10. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ	182
10.1. Статический анализ	182
10.2. Модальный анализ.....	193
10.3. Стационарный тепловой анализ	203
Заключение	211
Библиографический список	212
Приложение	213

Учебное издание

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ
И ИСПЫТАНИЙ РЭС**

Учебное пособие

Никитин Леонид Николаевич
Костюков Александр Сергеевич
Бобылкин Игорь Сергеевич

Редактор *Сахарова Д. О.*

Подписано к изданию 06.03.2020.
Объем данных 4,0 Мб.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»

394026 Воронеж, Московский просп., 14