ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПРИБОРАХ И СИСТЕМАХ

РОЛЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ, ТЕПЛОВЫХ, ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И МЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРИБОРАХ И СИСТЕМАХ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОГРЕСС И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Конкурентоспособность вновь создаваемых приборов и систем (ПС) в определяющей степени зависит от оперативности и качества их разработки, которые, в свою очередь, зависят от уровня применения компьютерных технологий на всех этапах жизненного цикла.

ПС как один из классов промышленной продукции отличаются по сложности реализации, условиям эксплуатации, а также многообразием и сложностью внешних воздействий, что ставит перед их разработчиками задачу удовлетворения зачастую противоречивых требований.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

В ПС как сложном техническом объекте протекают разнородные физические процессы. Отличные по своей природе физические процессы описываются различными уравнениями математической физики.

Электрические процессы в цепях с сосредоточенными параметрами представляются обыкновенными дифференциальными уравнениями, а в цепях с распределенными параметрами – волновыми уравнениями, **тепловые процессы** в конструкциях – уравнениями теплопроводности в частных производных второго порядка, а **механические процессы** колебаний печатных плат – бигармоническими и волновыми уравнениями в частных производных четвертого порядка. С учетом граничных и начальных условий процедуры согласования таких разных моделей в инженерных методиках автоматизированного проектирования, с целью получения на их основе данных, необходимых для решения задач анализа и обеспечения показателей надежности и качества ПС, встречают значительные трудности.

Кроме этого проблема осложняется тем, что современные ПС включают в себя большое количество комплектующих элементов (до десятков и сотен тысяч в одном образце ПС), каждый из которых представляет сложный объект, характер протекания физических процессов в которых, в конечном счете, и определяет функциональные и эксплуатационные свойства проектируемого образца ПС.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПС

Процесс проектирования реализуется путем моделирования различных физических процессов, протекающих в приборе при его функционировании.

Под **моделью ПС** понимается представленное в той или иной форме математическое описание, которое адекватно отражает сущность и характерные свойства рассматриваемого физического процесса, протекающего в схеме и конструкции ПС.

МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

- отражает электрические процессы, протекающие в схеме прибора, что должно обеспечить получение с заданной точностью функциональных и режимных электрических характеристик;
- включает в себя эквивалентные схемы ЭРЭ (резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности, диодов, транзисторов, микросхем и пр.);
- учитывает паразитные проводимости, емкости, индуктивности, взаимные индуктивности и другие параметры, отражающие влияние конструкции на протекающие электрические процессы.

МОДЕЛЬ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

- отражает тепловые процессы в конструкции ПС, связанные с теплообменом под влиянием окружающей среды, тепловыделениями в ЭРЭ, действием систем охлаждения и термостатирования, что должно обеспечить получение с заданной точностью тепловых характеристик;
- учитывает кондуктивные, конвективные и лучистые составляющие теплообмена в ПС.

МОДЕЛЬ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

- отражает механические процессы в конструкции, связанные с появлением механических деформаций и напряжений при механических воздействиях, что должно обеспечить получение с заданной точностью статических, частотных и динамических механических характеристик;
- учитывает распределенность масс ЭРЭ и анизотропность несущих конструкций механических свойств;
- учитывает эффект внутреннего трения в материалах конструкции при деформациях;
- учитывает жесткость крепления ЭРЭ к печатным платам, шасси и другим несущим конструкциям, а также крепление элементов конструкции друг с другом.

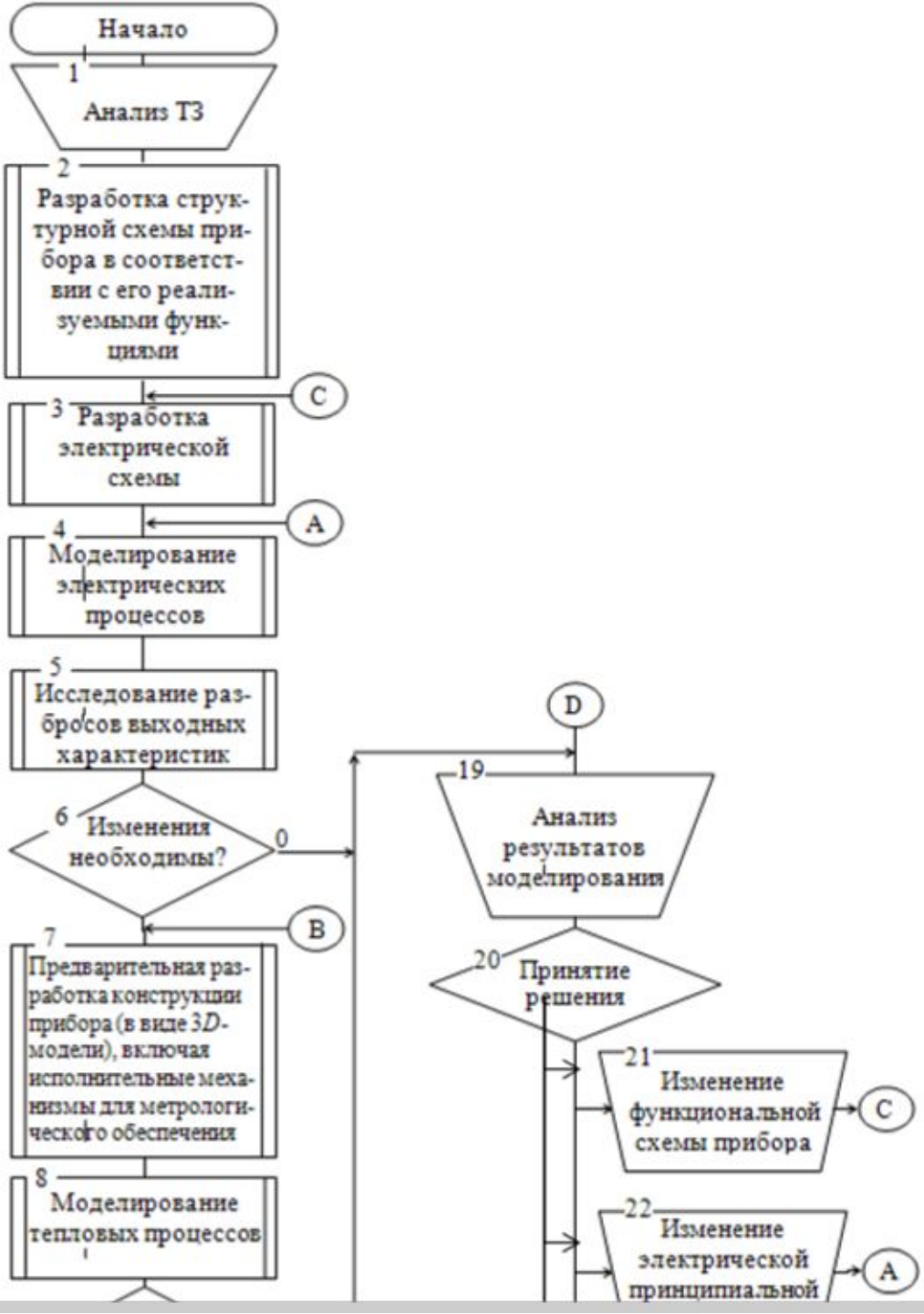
МОДЕЛЬ НАДЕЖНОСТИ

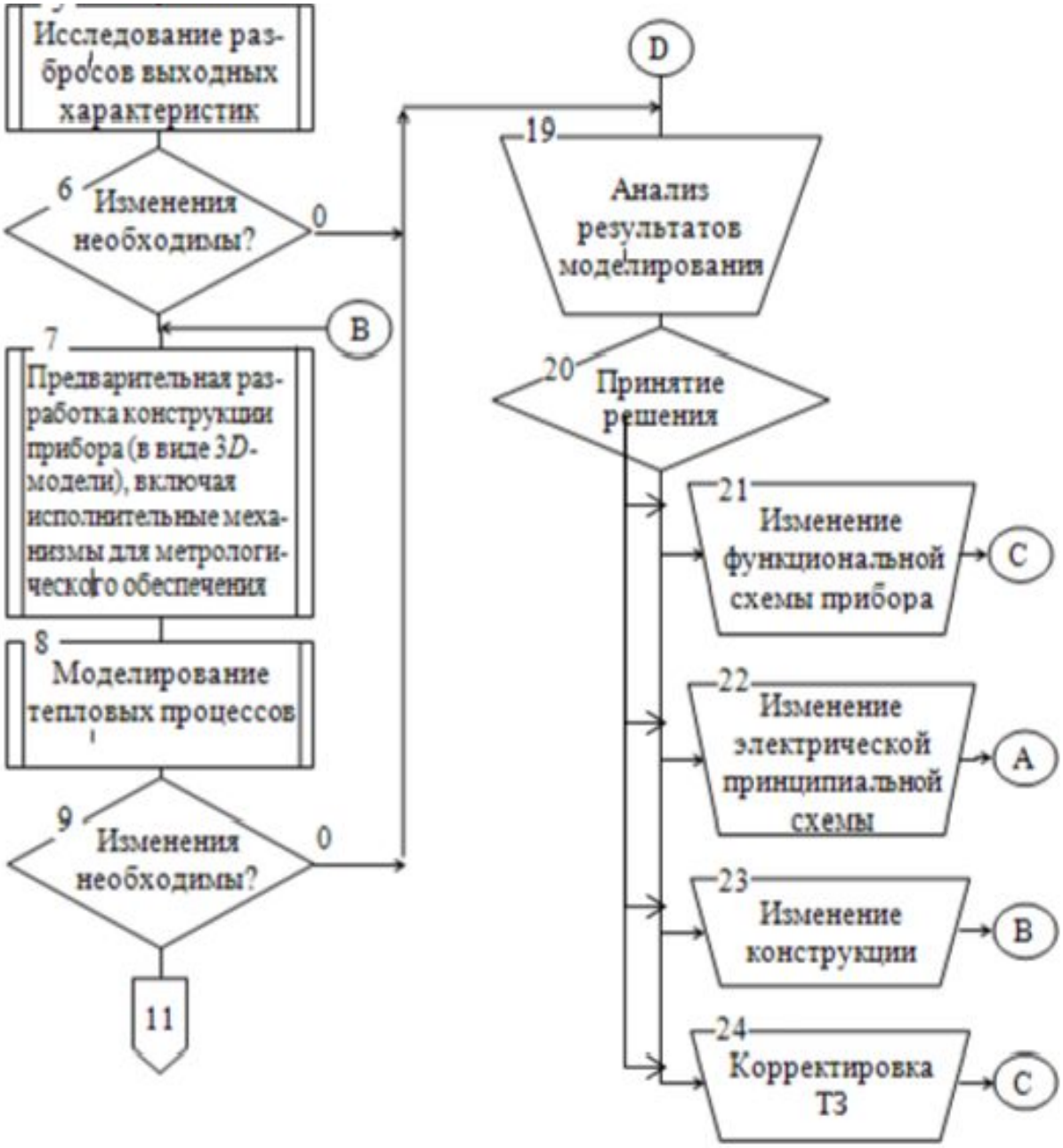
- отражает с заданной точностью характеристики надежности и качества ПС, связанные с технологическими факторами, тепловыми и механическими воздействиями, процессами старения;
- учитывает электрические, механические и тепловые режимы работы ЭРЭ;
- учитывает электрические, механические и тепловые режимы элементов конструкции;
- учитывает разбросы параметров ЭРЭ и элементов конструкции.

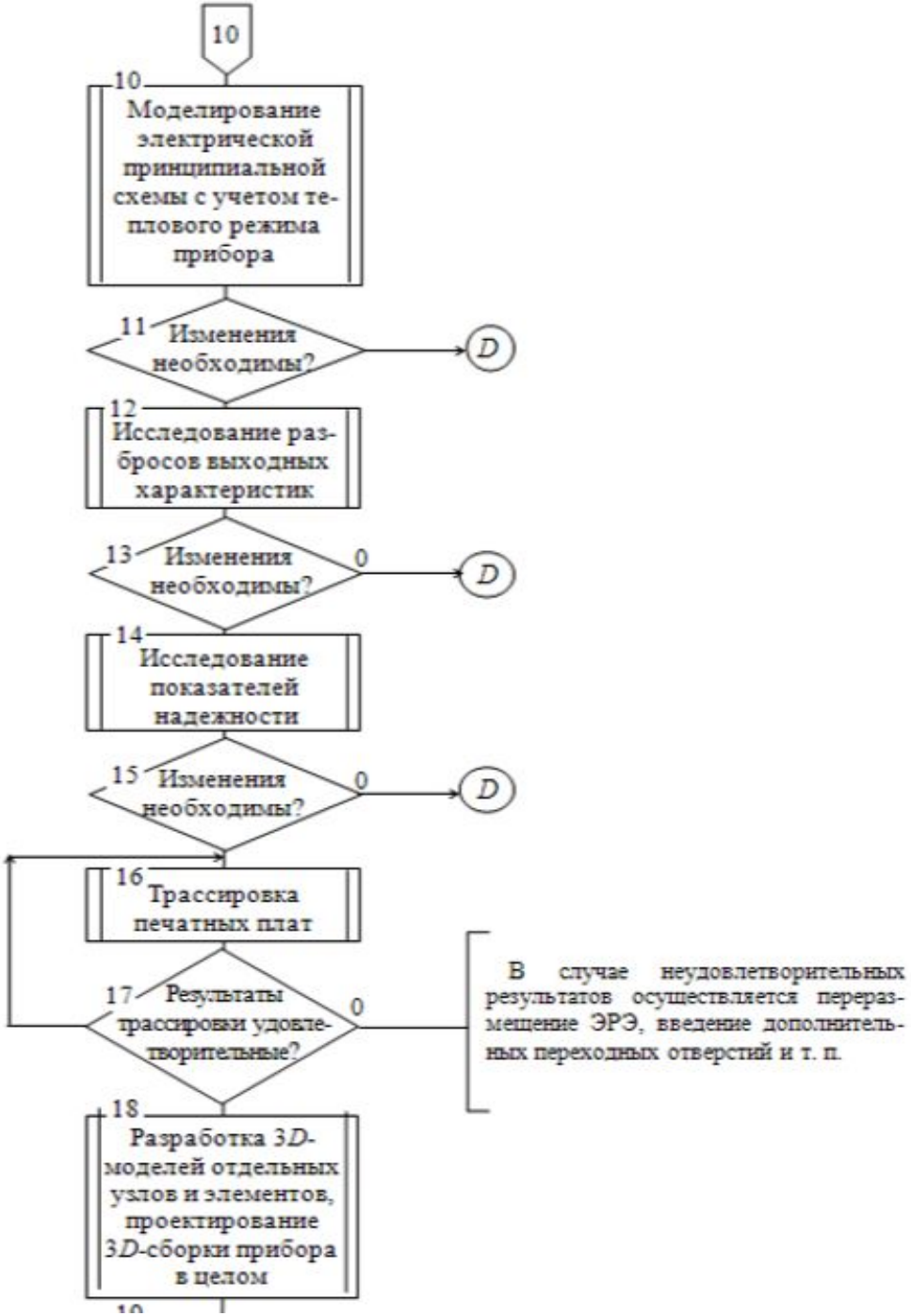
ВЗАИМОСВЯЗЬ ПРОЦЕССОВ

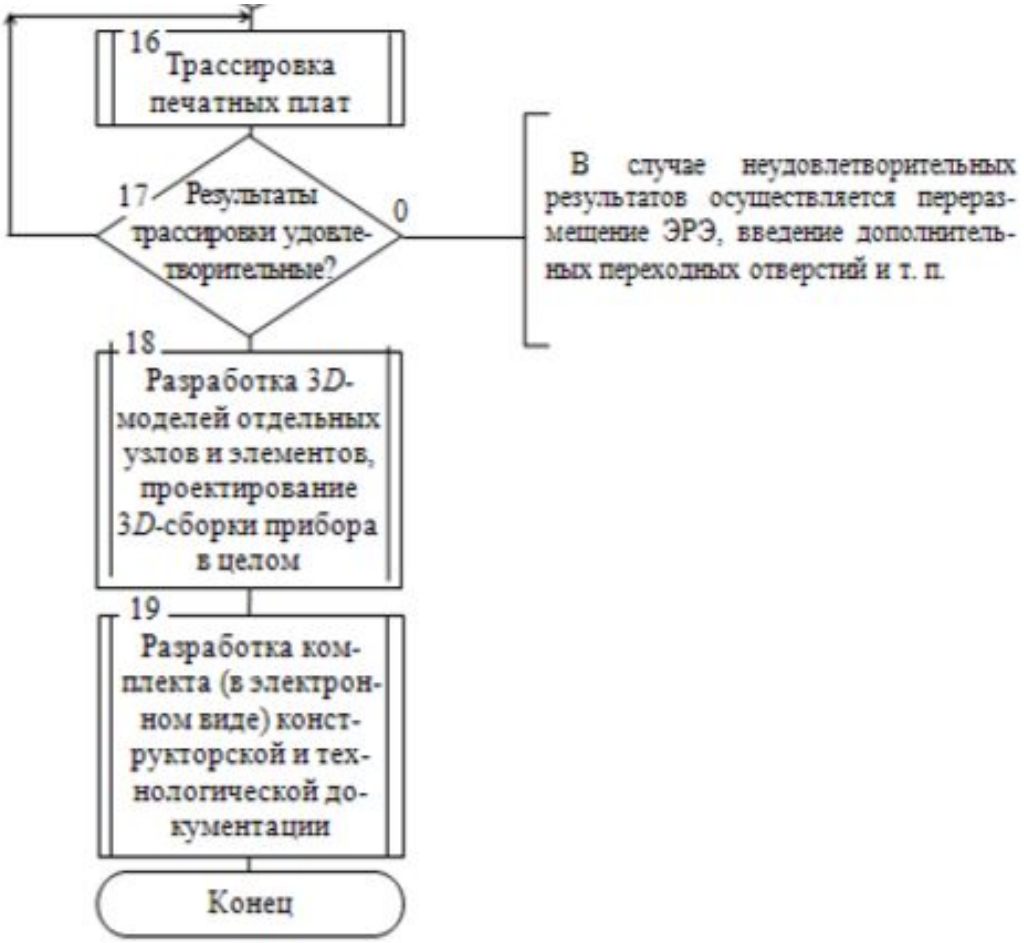
МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПС

Важную роль при проведении моделирования физических процессов, протекающих в ПС, играет его правильный порядок. Он определяется, с одной стороны, логикой проектирования ПС, а с другой – взаимосвязью моделей физических процессов между собой.


Начало
1
Анализ ТЗ
2
Разработка структурной схемы прибора в соответствии с его реализуемыми функциями
C
3
Разработка электрической схемы
A
4
Моделирование электрических процессов
5
Исследование разбросов выходных характеристик
6
Изменения необходимы?
0
B
7
Предварительная разработка конструкции прибора (в виде 3D-модели), включая исполнительные механизмы для метрологического обеспечения
8
Моделирование тепловых процессов
D
19
Анализ результатов моделирования
20
Принятие решения
21
Изменение функциональной схемы прибора
C
22
Изменение электрической принципиальной
A


Исследование разбросов выходных характеристик
6
Изменения необходимы?
0
B
7
Предварительная разработка конструкции прибора (в виде 3D-модели), включая исполнительные механизмы для метрологического обеспечения
8
Моделирование тепловых процессов
9
Изменения необходимы?
0
11
D
19
Анализ результатов моделирования
20
Принятие решения
21
Изменение функциональной схемы прибора
C
22
Изменение электрической принципиальной схемы
A
23
Изменение конструкции
B
24
Корректировка ТЗ
C


10
10
Моделирование электрической принципиальной схемы с учетом теплового режима прибора
11
Изменения необходимы?
D
12
Исследование разбросов выходных характеристик
13
Изменения необходимы?
0
D
14
Исследование показателей надежности
15
Изменения необходимы?
0
D
16
Трассировка печатных плат
17
Результаты трассировки удовлетворительные?
0
В случае неудовлетворительных результатов осуществляется перераз-мещение ЭРЭ, введение дополнительных переходных отверстий и т. п.
18
Разработка 3D-моделей отдельных узлов и элементов, проектирование 3D-сборки прибора в целом


16
Трассировка печатных плат
17
Результаты трассировки удовлетворительные?
0
В случае неудовлетворительных результатов осуществляется переразмещение ЭРЭ, введение дополнительных переходных отверстий и т. п.
18
Разработка 3D-моделей отдельных узлов и элементов, проектирование 3D-сборки прибора в целом
19
Разработка комплекта (в электронном виде) конструкторской и технологической документации
Конец

ПС КАК СИСТЕМНЫЙ ОБЪЕКТ

Видна тесная связь пяти подсистем – «алгоритм работы», «схема», «конструкция», «технология» и «эксплуатация» – внутри системы ПС.

Общесистемным свойством ПС, объединяющим все его подсистемы, является свойство надежности, которое закладывается при проектировании, обеспечивается при производстве и поддерживается во время эксплуатации.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СОВОКУПНОСТИ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ КАК СИСТЕМЫ

Конструкция ПС с точки зрения надежности представляется как система протекающих физических процессов (электрических, электромагнитных, тепловых, механических и пр.), изучение каждого процесса в отдельности как элемента системы и обеспечение надежности ПС (с позиции обеспечения характеристик равновесия каждого процесса) еще не гарантируют полного выявления особенностей свойства надежности ПС в целом, проявляющихся при совместном действии различных факторов на ЭРЭ.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПС

Анализ схем, конструкций или технологических процессов проводится в виде комплексного математического моделирования на ПК совокупности протекающих физических и прочих процессов. Под термином «технический» далее будем понимать любой процесс, подлежащий системному анализу.

Любой технический процесс, рассматриваемый при проектировании ПС или технологического процесса, можно формально описать через математический оператор, связывающий вектор выходных характеристик

$$\overline{Y} = \left[y_1, y_2, \ldots, y_n \right]^T,$$

(T – знак транспонирования) с вектором выходных воздействий

$$\overline{X} = \left[x_1, x_2, \ldots, x_m \right]^T$$

и вектором внутренних параметров

$$\overline{Q} = \left[q_1, q_2, \ldots, q_L \right]^T,$$

зависящих от вектора внешних воздействий

$$\overline{Z} = \left[z_1, z_2, \ldots, z_K \right]^T.$$

Модель электрических процессов:

$\bar{X} =$ воздействующие источники тока,
воздействующие источники напряжения,
воздействующие источники тока и напряжения,
задаваемые в виде функции от времени ($\zeta = \tau$) и т. д.;

$\bar{Y} =$ мощности рассеивания на ЭРЭ,
комплексный коэффициент передачи ($\zeta = \omega$),
амплитудно-фазочастотные характеристики ($\zeta = \omega$),
импульсные и переходные характеристики ($\zeta = \tau$),
коэффициенты электрической нагрузки ЭРЭ и т. д.;

$\bar{Q} =$ проводимость, сопротивление, емкость,
индуктивность, коэффициент трансформации,
коэффициент усиления (передачи) и т. д.;

$\bar{Z} =$ температуры ЭРЭ, механические напряжения и деформации в материалах ЭРЭ, временной фактор (постепенное изменение параметров из-за старения и износа), технологический фактор (разбросы изготовления).

Модель тепловых процессов:

$\bar{X} =$ мощности рассеивания на ЭРЭ, температуры окружающей среды и конструктивных элементов, определяющие граничные условия (мощности и температуры могут являться функциями от времени ($\zeta = \tau$) и т. д.;

$\bar{Y} =$ температуры ЭРЭ, коэффициенты тепловой нагрузки ЭРЭ, характеристика разогрева ($\zeta = \tau$), стационарное температурное поле конструкции ($\zeta = l_1$, $\zeta = l_2$, ..., $\zeta = l_k$) и т. д.;

$\bar{Q} =$ коэффициенты теплопроводности материалов, удельные теплоемкости и плотности материалов, геометрические параметры ЭРЭ, степень черноты поверхностей конструктивных материалов и т. д.;

Модель механических процессов:

$\bar{X} =$ виброускорение на элементах крепления в заданном частотном диапазоне ($\zeta = \omega$), амплитуда и форма ударных воздействий ($\zeta = \tau$) и т. д.;

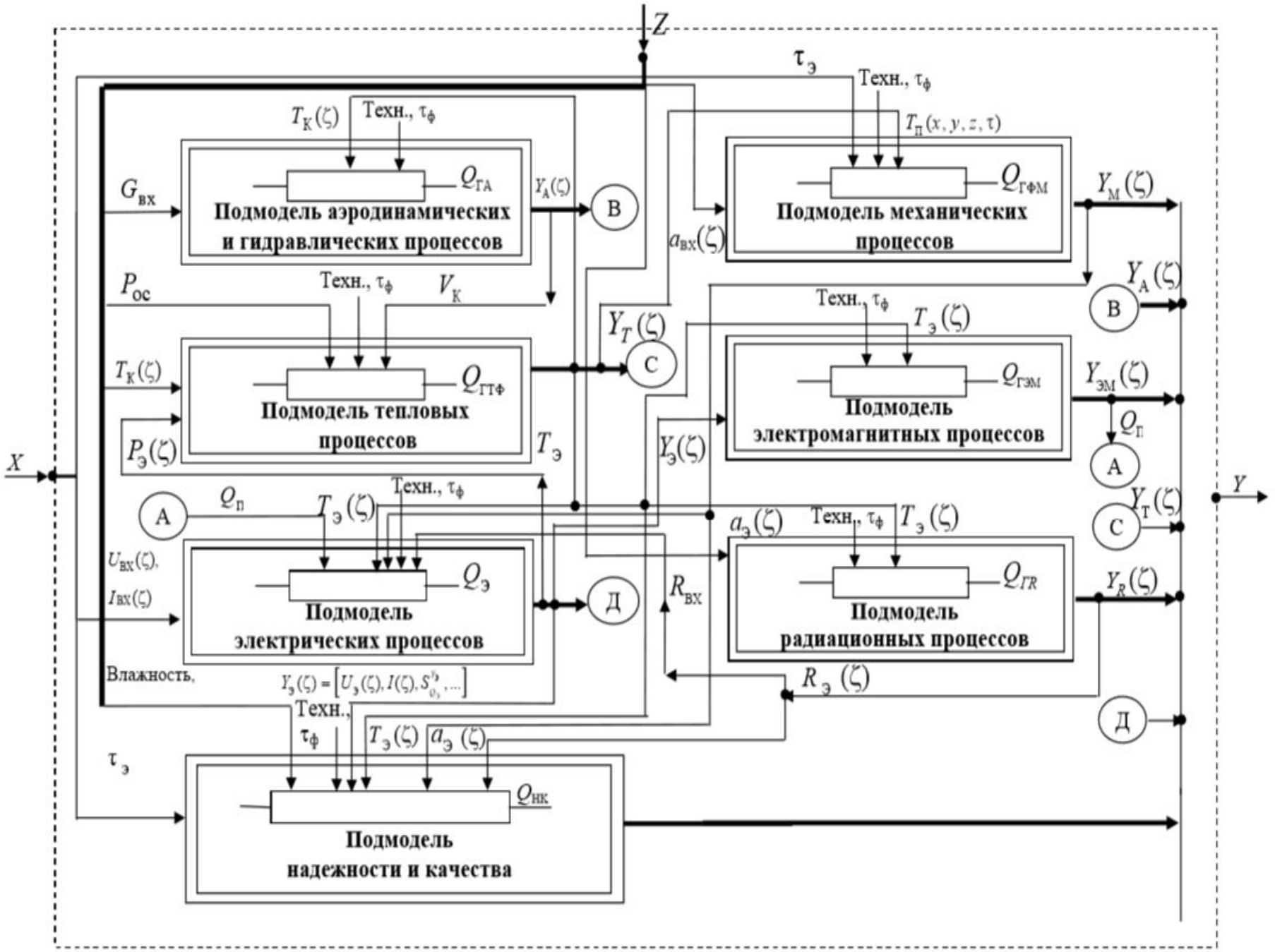
$\bar{Y} =$ резонансные частоты конструкции, частотная характеристика конструкции [8] – ($\zeta = \omega$), распределение виброускорений по конструкции ($\zeta = l_1,\ \zeta = l_2,\ \ldots,\ \zeta = l_k$) виброускорений на ЭРЭ ($\zeta = \omega$), коэффициент динамичности конструкции ($\zeta = s$), отклик конструкции в заданной точке на ударное воздействие ($\zeta = \tau$) и т. д.;

$\bar{Q} =$ модули упругости и коэффициенты Пуассона материалов, коэффициенты рассеивания энергии в материалах, плотности материалов, массы и геометрические параметры ЭРЭ и т. д.;

$\bar{Z} =$ температурное поле конструкции, временной фактор, технологический фактор.

КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ ПС

Задачи проектирования ПС в большинстве случаев могут эффективно решаться на основе комплексной модели физических процессов ПС. В общем случае комплексная модель прибора (с точки зрения протекания в ней разнородных физических процессов) может быть представлена совокупностью подмоделей физических процессов и основных связей между ними


Z
τэ
Техн., τф
TК(ζ)
Техн., τф
TП(x, y, z, τ)
Gвх
QГА
Подмодель аэродинамических и гидравлических процессов
YА(ζ)
В
aвх(ζ)
QГФМ
Подмодель механических процессов
YМ(ζ)
Pос
Техн., τф
VК
YА(ζ)
В
Техн., τф
Tэ(ζ)
YT(ζ)
С
TК(ζ)
QГТФ
Подмодель тепловых процессов
QГЭМ
Подмодель электромагнитных процессов
YЭМ(ζ)
QП
Pэ(ζ)
Tэ
Yэ(ζ)
А
X
Y
А
QП
Tэ(ζ)
Техн., τф
aэ(ζ)
Техн., τф
Tэ(ζ)
YT(ζ)
С
Uвх(ζ),
Iвх(ζ)
Qэ
Подмодель электрических процессов
Д
Rвх
QГR
Подмодель радиационных процессов
YR(ζ)
Влажность,
Yэ(ζ) = [Uэ(ζ), I(ζ), S^{Yэ}_{Qэ}, ...]
Rэ(ζ)
Техн., τф
Tэ(ζ)
aэ(ζ)
Д
τэ
QНК
Подмодель надежности и качества

Тип модели
Расчетные модели
Вид модели
Модели электрических процессов
Режимные
Функциональные
Полные
Вектор-функция
Дифферен. уравнение
Матричное уравнение
Аналитические модели
Модели тепловых процессов
Стационарные
Нестационарные
Направленный граф
Блок-схема
Структурные модели
Модели механических процессов
Статические
Динамические
Соединение многополюсников
Гиперграф
Морфологические модели
Комплексные
Эквивалентная цепь
Ненаправленный граф
Топологические модели

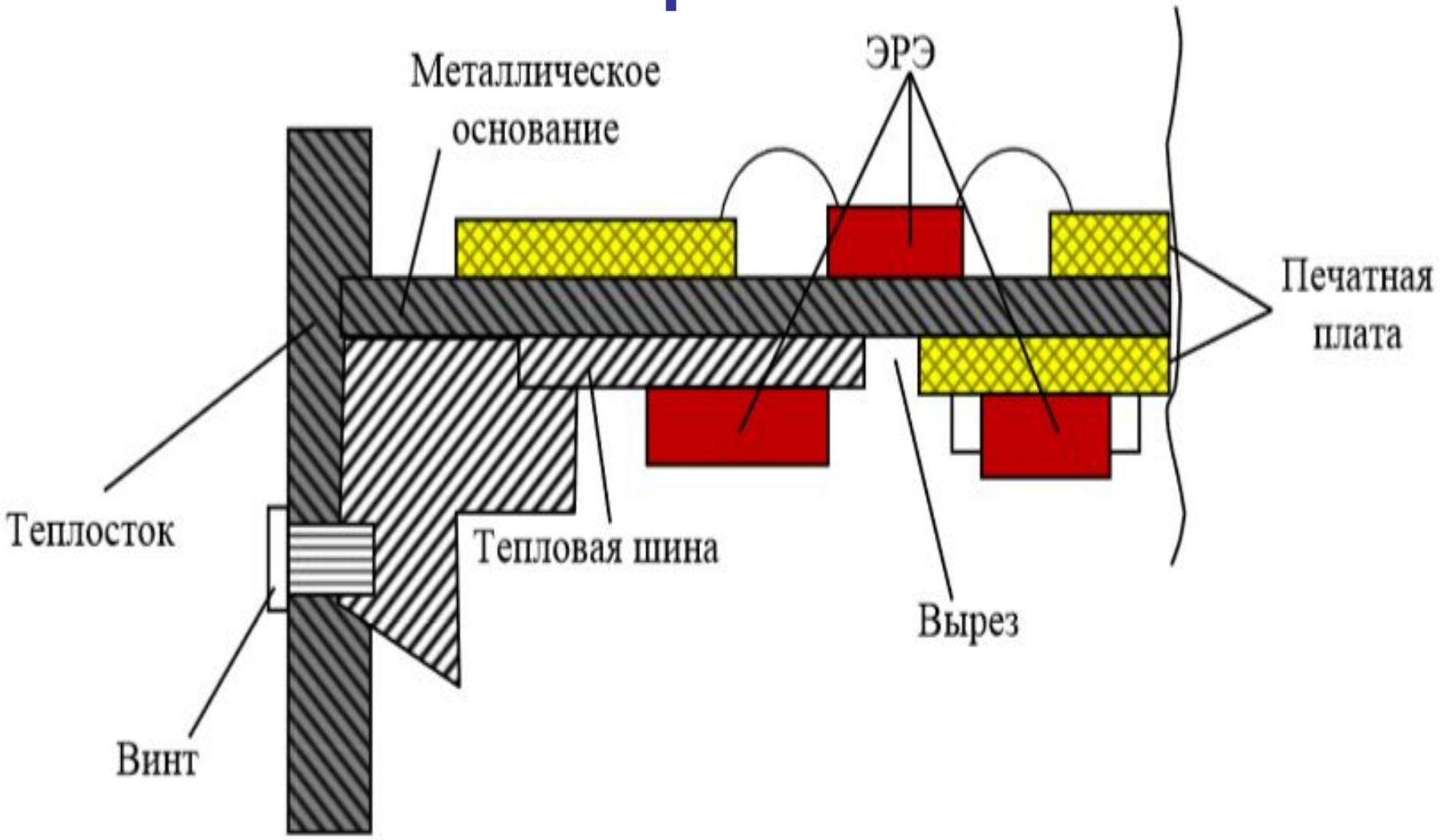
Под аналитической расчетной моделью понимается математическая модель, представленная средствами математического анализа и алгебры в форме буквенных выражений, определяющих зависимость выходных характеристик ПС и его показателей от входных воздействий, внутренних параметров и независимых аргументов (времени, частоты, пространственных координат, переменной преобразования Лапласа и пр.).

Под структурной расчетной моделью понимается математическая модель, представленная в форме направленного графа или блок-схемы, определяющих внутреннее строение прибора с точки зрения последовательности преобразования ее переменных величин в соответствии с принятыми причинно-следственными связями в протекающих физических процессах.

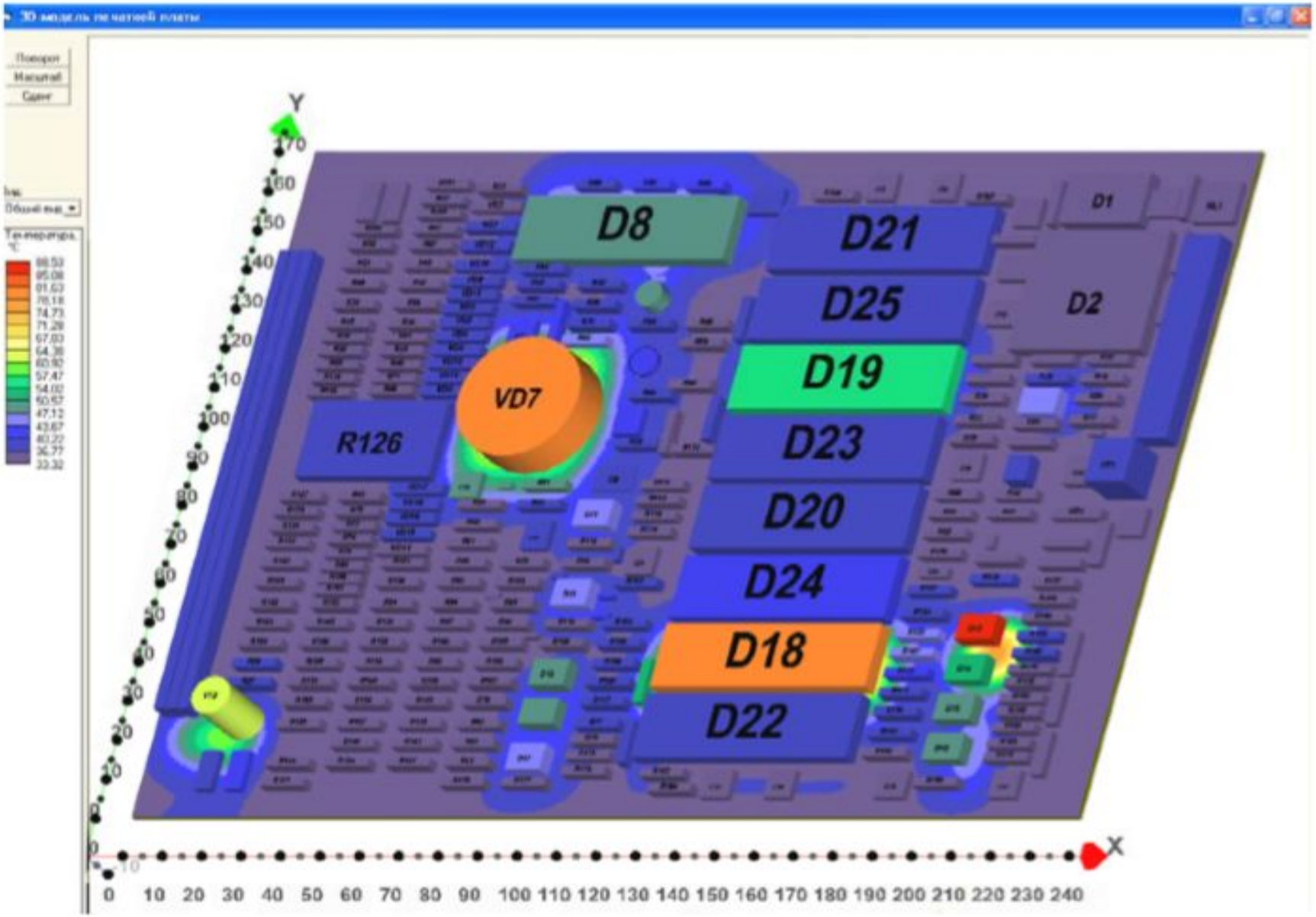
Под топологической расчетной моделью понимается математическая модель, изображенная как эквивалентная электрическая, механическая или тепловая цепь или в общем виде как ненаправленный топологический граф, на котором заданы переменные величины и параметры рассматриваемых физических процессов и который полностью определяет физическую взаимосвязь этих переменных через параметры.

Под морфологической расчетной моделью понимается математическая модель протекающих физических процессов, представленная в форме соединения многополюсников или ненаправленного морфологического графа (гиперграфа), определяющих способ построения рассматриваемого схемно-конструкторского решения прибора из выделенных составных частей.

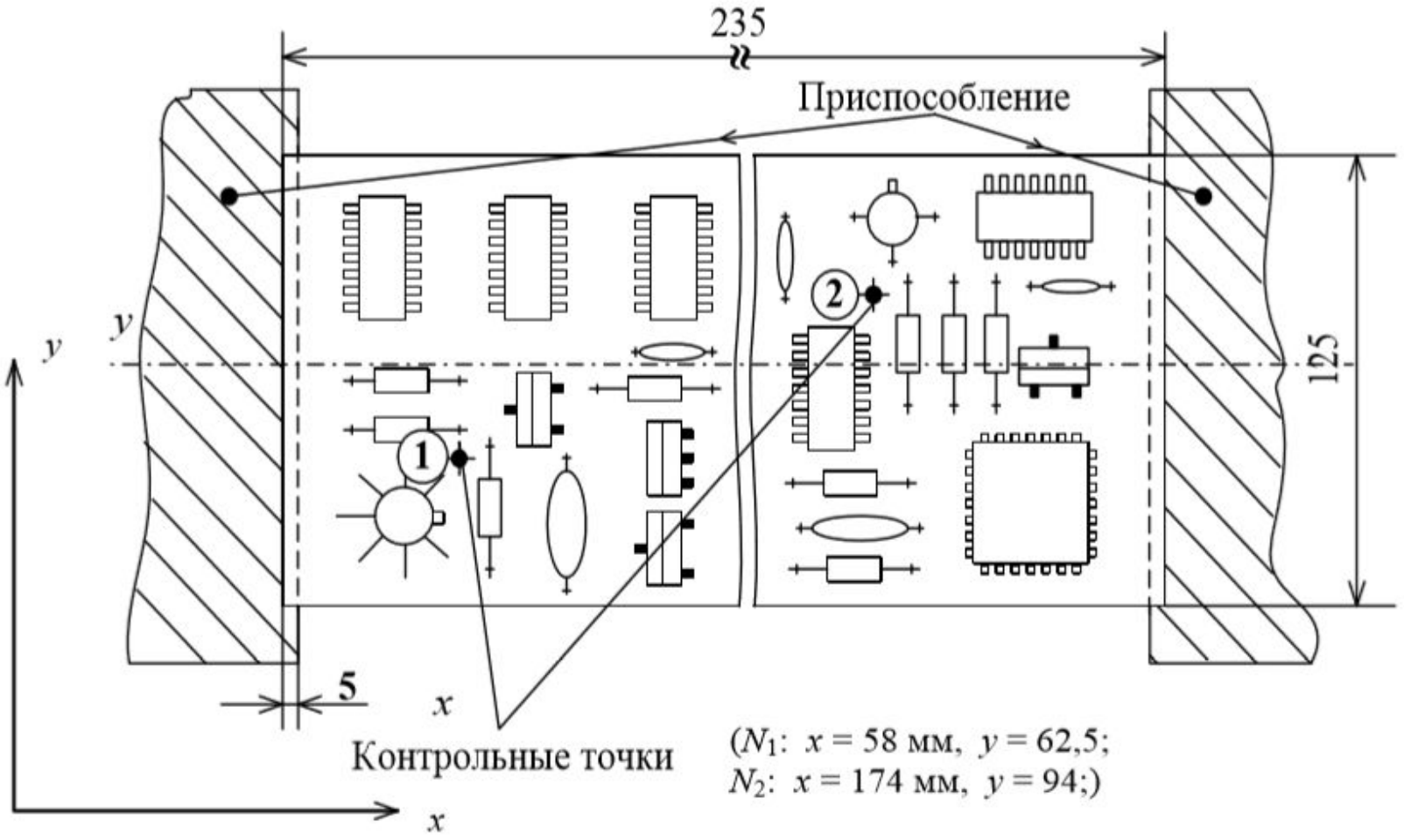
ПРИМЕРЫ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ



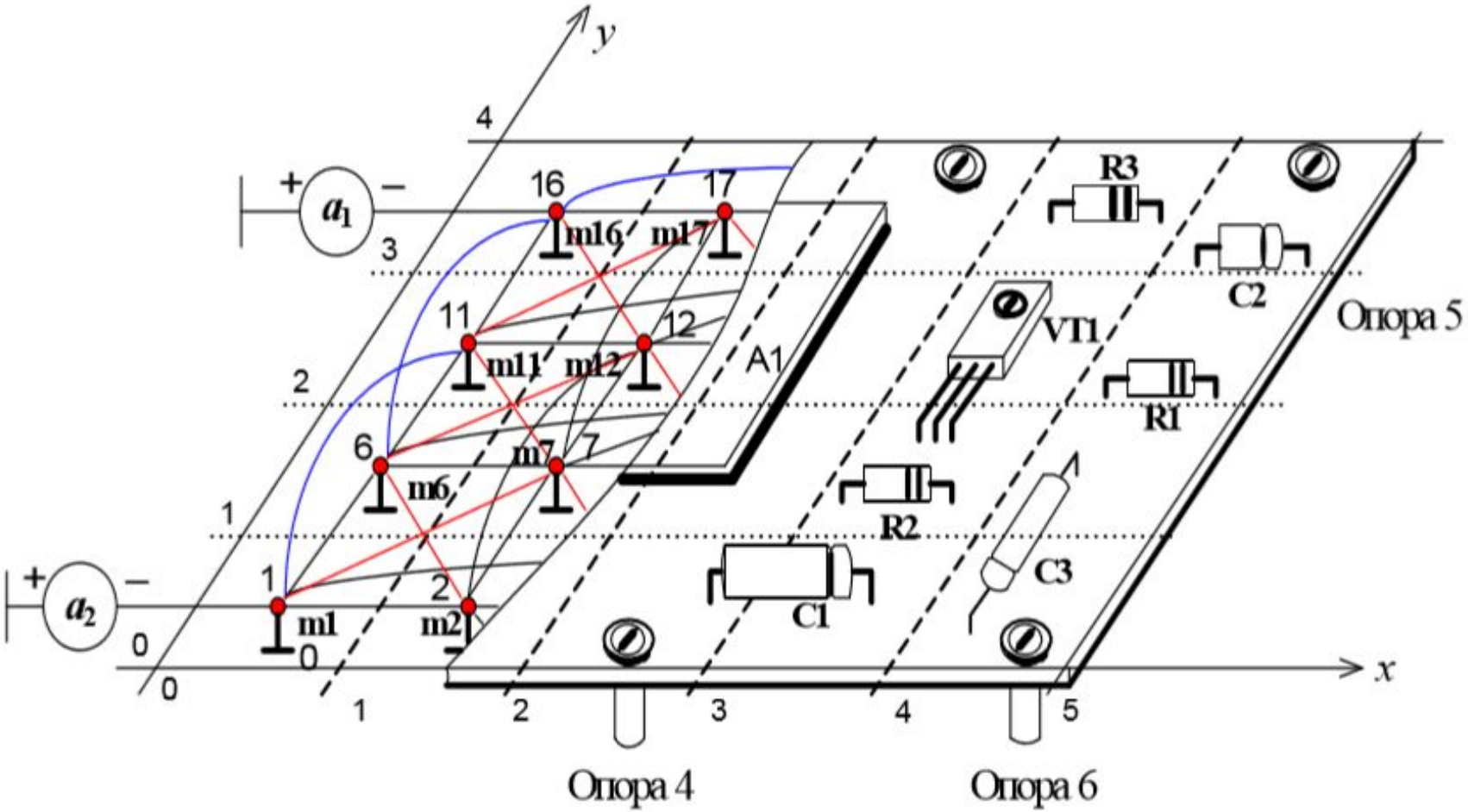
ТЕРМОГРАММА

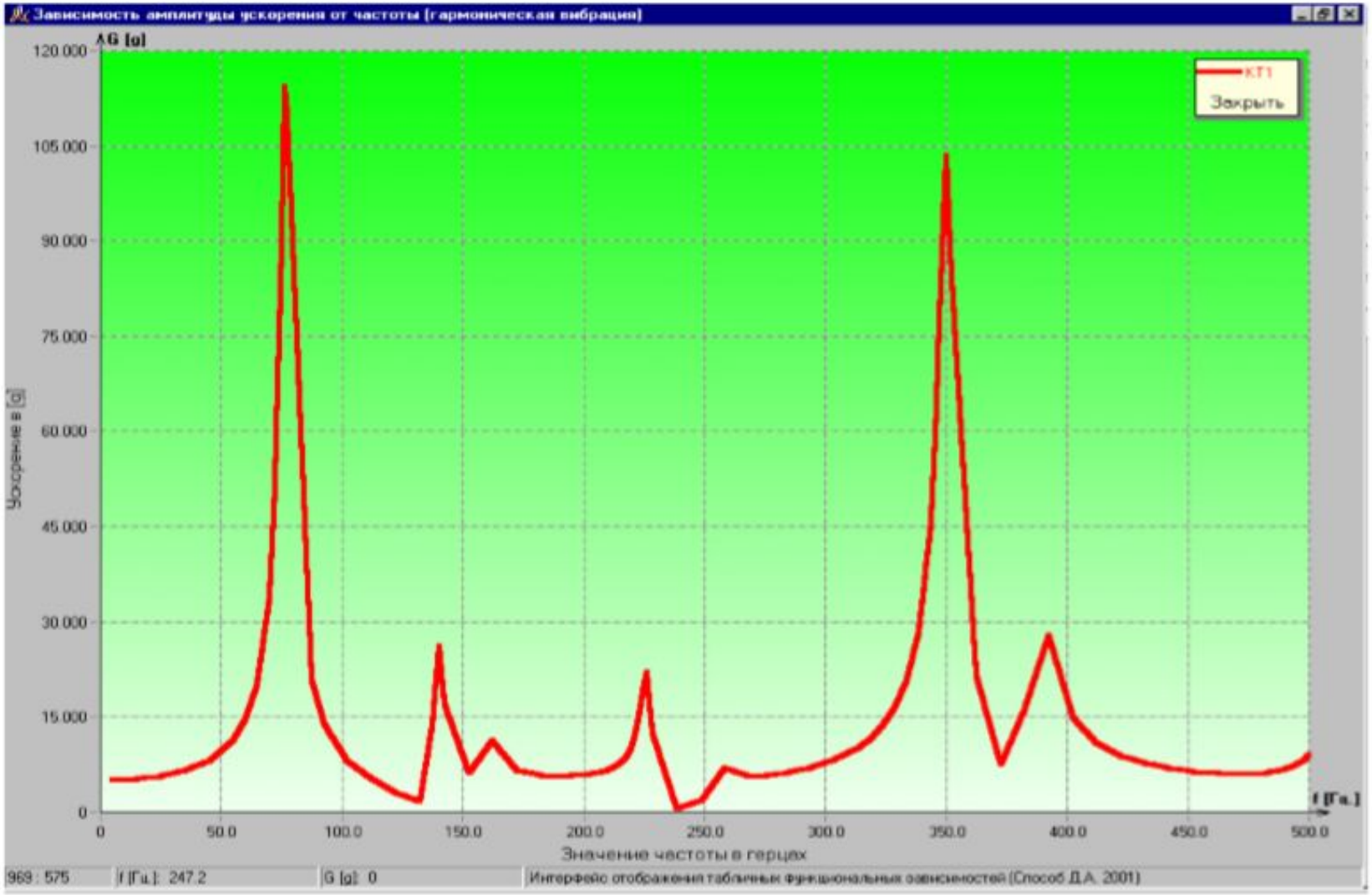


ПРИМЕРЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ



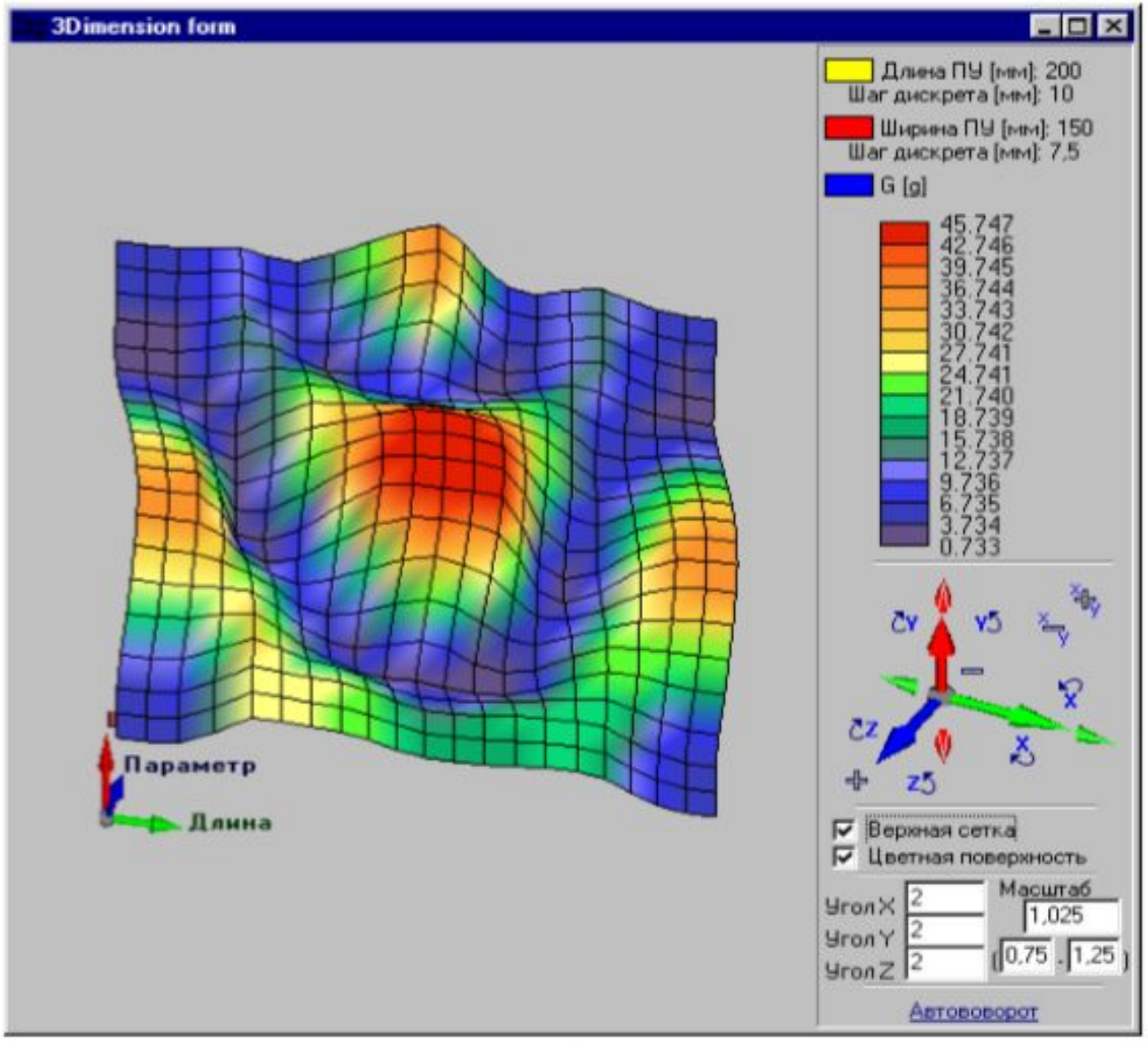
ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ВИБРАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПЕЧАТНОГО УЗЛА





а

Пример результатов моделирования механических процессов в печатных узлах:
а – зависимость виброускорения от частоты вибрации в контрольной точке;



б

Карта механических режимов работы ЭРЭ