

УДК 621.396.6, 004.942, 519.876.5

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И СТРУКТУРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ НА ОСНОВЕ ИМПЛИКАТИВНОЙ АЛГЕБРЫ ВЫБОРА

**Елизаров А.В., Покровский В.Г.**

*Пензенский государственный технологический университет, Пенза, e-mail: Alexey314@yandex.ru*

Повышение качества и сокращение сроков проектирования изделий приборостроения в современных условиях невозможно без привлечения средств автоматизации проектных и конструкторских работ. До недавнего времени автоматизация проектных работ сводилась к производству графической проектной документации. Теперь от системы автоматизированного проектирования требуется выполнять весь комплекс расчётов на механические воздействия, расчёт температурных режимов объекта проектирования, расчёт помехозащищённости и электромагнитной обстановки и т.д. Целью исследования является разработка способа построения систем уравнений для определения составляющих обобщённых сил по направлениям координатных осей для решения задач оптимизации структуры проектируемых конструкций электронной аппаратуры и приборов. В процессе выполнения исследования использовались: метод конечных элементов; положения линейной теории упругости; математический аппарат импликативной алгебры выбора. Описан способ построения систем алгебраических уравнений и определения составляющих обобщённых сил по направлениям координатных осей. Способ может быть применён для решения задач моделирования и структурной оптимизации конструкций электронной аппаратуры. Использование математических моделей конструкций с нефиксированным количеством переменных проектирования позволяет в процессе решения задачи моделирования выполнять преобразования моделей конструкций. Таким образом, становится возможным решать задачи оптимизации структуры проектируемой конструкции. Использование математических моделей конструкций с нефиксированным количеством переменных проектирования позволяет в процессе решения задачи моделирования выполнять преобразования моделей конструкций. Таким образом, становится возможным решать задачи оптимизации структуры проектируемой конструкции.

**Ключевые слова:** напряжённо-деформированное состояние; конструкции электронной аппаратуры; автоматизация проектирования; инженерный анализ конструкций, оптимизация конструкций.

## MODELLING AND STRUCTURAL OPTIMIZATION OF CONSTRUCTIONS OF ELECTRONIC EQUIPMENT ON THE BASIS OF THE IMPLICATIVE ALGEBRA OF CHOICE

**Elizarov A.V., Pokrovskij V.G.**

*Penza State Technological University, Penza, email: Alexey314@yandex.ru*

Improvement of quality and reduction of terms of designing of products of instrument making in modern conditions is impossible without attraction of means of automation of design and design works. Until recently automation of design works was reduced to manufacture of the graphic design documentation. Now from system of the automated designing it is required to carry out all complex of calculations on mechanical influences, calculation of temperature modes of object of designing, calculation of noise immunity and electromagnetic conditions etc. The aim of investigation is development of a way of building of systems of the equations for definition of the making generalized forces in directions of co-ordinate axes for the decision of problems of optimisation of structure of projected designs of electronic equipment and devices is. In the course of research performance has been used: finite element method; principles of the linear theory of elasticity; mathematical formalism (apparatus) of implicative algebra of choice. The way of building of systems of the algebraic equations and definition of the making generalized forces in directions of co-ordinate axes is described in the article. The way can be applied to the decision of problems of modelling and structural optimisation of designs of electronic equipment. Use of mathematical models of designs with unstable quantity of variables of designing allows in the course of decision of a problem of modelling to carry out transformation of models of designs. Thus, begins possible to solve problems of optimisation of structure of a projected design. Use of mathematical models of designs with non-fixed number of design variables allows in the course of decision of a problem of modelling to carry out transformation of models of designs. Thus, begins possible to solve problems of optimisation of structure of a projected design.

**Keywords:** the stress-strain state; electronic equipment constructions; design automation; engineering analysis of constructions, constructions optimization

Повышение качества выпускаемой продукции, а также сокращение сроков освоения и внедрения новой техники, возможно при условии применения средств автоматизации проектно-конструкторских работ. Неотъемлемой частью процесса автоматизированного проектирования новых изделий является решение задач моделирования этих изделий при заданных эксплуатационных воздействиях. Это возможно реализо-

вать с помощью программно-технических комплексов, реализующих технологии автоматизированного проектирования и моделирования. Такие комплексы могут быть построены на основе использования численных методов анализа физических процессов в проектируемых конструкциях.

При решении задач оптимизации и изменении структуры модели проектируемой конструкции возникает необходимость в мо-

дификации математической модели проектируемой конструкции. Как следствие, изменяется количество переменных проектирования. Для осуществления модификации математической модели объекта проектирования требуется использовать соответствующий математический аппарат предметно-ориентированной логики. На основе такого математического аппарата можно строить логико-алгебраические выражения, используя которые можно вводить и исключать переменные и функции. Это даёт возможность создавать математические модели проектируемых изделий с нефиксированным количеством переменных проектирования.

Разработка программно-технических комплексов автоматизированного проектирования и имитационного моделирования, позволяющих решать задачи структурной оптимизации проектируемых конструкций, является актуальной. Решение задач оптимизации объектов проектирования, которые обладают дискретной структурой, возможно при условии применения математических моделей с нефиксированным количеством переменных проектирования.

Для того, чтобы задать проект стержневой системы, назначаются переменные проектирования. В качестве переменных проектирования элементов стержневой системы можно рассматривать: геометрические параметры поперечных сечений стержневых элементов, координаты их торцевых граней, физико-механические характеристики материала конструкции [1].

Для создания формализованного описания процедуры удаления дискретного элемента модели конструкции используется операция предикатной дизъюнкции аппарата имплицитивной алгебры выбора. Матрица-вектор переменных проектирования дискретного элемента стержневой системы  $B_{E_i}^{g_{U^e}}$  является аналогом предметной переменной  $y_i$ . Выбор или исключение дискретного элемента стержневой системы определяется как выбор или исключение матрицы-вектора переменных проектирования дискретного элемента [1]:

$$z_1 = \vee_{(\alpha_i^{g_{U^e}})} \left( B_{E_i}^{g_{U^e}} \right) = \alpha_i^{g_{U^e}} \overline{B_{E_i}^{g_{U^e}}} \quad (1)$$

Из уравнений, описывающих поведение стержневой системы, определяются переменные состояния. В качестве переменных состояния можно рассматривать составляющие смещений торцевых граней стержня [2]:

$$\bar{z} = \left[ U_m, V_m, W_m, \Theta_{X_m}, \Theta_{Y_m}, \Theta_{Z_m}, U_n, V_n, W_n, \Theta_{X_n}, \Theta_{Y_n}, \Theta_{Z_n} \right] \quad (2)$$

Сумма узловых реакций определяет-ся как скалярное произведение матрицы-вектора составляющих узловых смещений и матрицы-вектора узловых составляющих жёсткостей [3]:

$$\sum_1^{N_e} A_e^{g_{U^r}} = \overline{K^{g_{U^r}}} \cdot \overline{T^{g_{U^r}}} \quad (3)$$

Из матриц жесткостей стержней выделяются вектор-строки, соответствующие силовым составляющим

$$F_e^{g_{U^1}} = \sum_1^{N_e} F_e^{g_{U^1}}$$

по направлению координаты  $X$ . Составляющая  $F_e^{g_{U^1}}$  определена как проекция обобщенной узловой силы на координатную ось  $X$ . Вектор-строки соответствуют матрицам-векторам составляющих жесткостей стержневых элементов [4].

Сумма составляющих узловых сил (проекции на ось  $X$ ), соответствующих узлу сетки с координатами  $i, j, k$  определяется как скалярное произведение матрицы-вектора составляющих смещений  $T^{g_{U^1}}$  и матрицы-вектора узловых составляющих жесткостей  $K^{g_{U^1}}$ :

$$\sum_1^{N_e} F_e^{g_{U^1}} = \overline{K^{g_{U^1}}} \cdot \overline{T^{g_{U^1}}} \quad (4)$$

Из выражения (3) формируется уравнение для вычисления узлового смещения, относящегося к узлу с координатами  $i, j, k$ . [2]:

$$t_{M(p)}^{g_{U^e}} = \frac{\sum_1^{N_e} A_e^{g_{U^r}} - \sum_1^{N_e} \left( \sum_1^{N_p-1} t_{M(p)}^{g_{U^e}} \cdot k_{V(p)}^{g_{U^e r}} \right)}{\sum_1^{N_e} k_{V(p)}^{g_{U^e r}}} \quad (5)$$

Составляющая обобщенной силы, соответствующая смещению  $V$  по направлению координаты  $Y$ :

$$\sum_1^{N_e} F_e^{g_{U^2}} = \overline{K^{g_{U^2}}} \cdot \overline{T^{g_{U^2}}} \quad (6)$$

Составляющая обобщенной силы, соответствующая смещению  $W$  по направлению координаты  $Z$ :

$$\sum_1^{N_e} F_e^{g_{U^3}} = \overline{K^{g_{U^3}}} \cdot \overline{T^{g_{U^3}}} \quad (7)$$

Составляющая обобщённого момента, соответствующая углу поворота  $\Theta_X$ :

$$\sum_1^{N_e} M_e^{g_U^4} = \overline{K^{g_U^4}} \cdot \overline{T^{g_U}} \quad (8)$$

Составляющая обобщённого момента, соответствующая углу поворота  $\Theta_Y$ :

$$\sum_1^{N_e} M_e^{g_U^5} = \overline{K^{g_U^5}} \cdot \overline{T^{g_U}} \quad (9)$$

Составляющая обобщённого момента, соответствующая углу поворота  $\Theta_Z$ :

$$\sum_1^{N_e} M_e^{g_U^6} = \overline{K^{g_U^6}} \cdot \overline{T^{g_U}} \quad (10)$$

Из соотношений (4), (6) – (10) определяются смещения и углы поворотов торцевых граней стержневых элементов (5). По найденным линейным и угловым смещениям,

вычисляются механические напряжения в элементах конструкции [5].

Ниже приведено решение задачи структурной оптимизации стержневой конструкции при одновариантном механическом нагружении. Начальная структура представлена объёмной конструкцией, выполненной из элементов в виде труб из стали квадратного сечения со стороной 40 мм, количество стержневых элементов – 600 шт.; масса конструкции — 1763,448 кг; силовые воздействия по направлению оси  $Y$  – 7000 Н; длина заготовки по оси  $X$  – 10 м; высота по оси  $Y$  – 2 м; глубина по оси  $Z$  – 1 м. Сеточная модель исходной конструкции изображена на рисунке 1. На этом же рисунке условно изображены силовые воздействия, которые локализованы в узлах нижнего пояса сеточной модели конструкции. Также, в нижнем поясе сеточной модели условно изображены опоры, которые моделируют жёсткое закрепление конструкции для предотвращения вертикальных смещений конструкции.

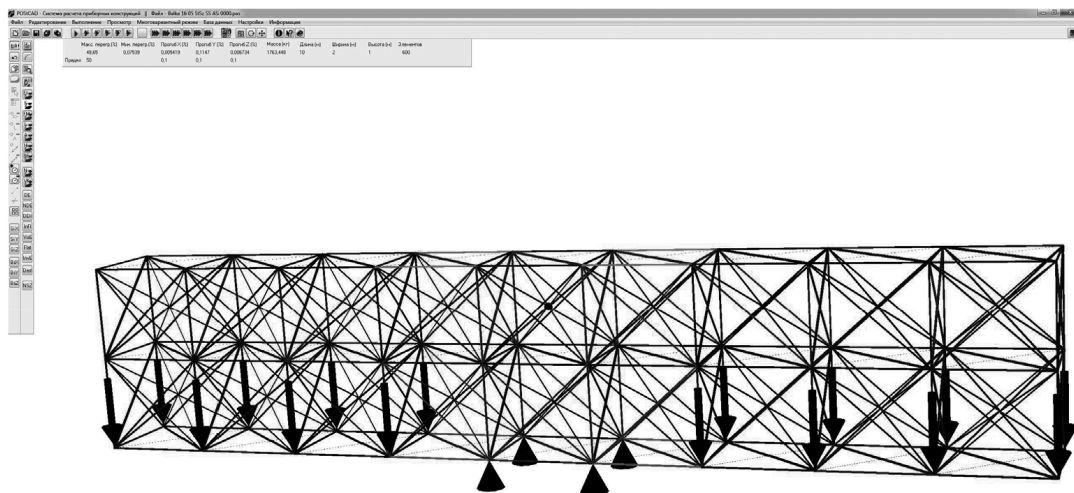


Рис. 1. Сеточная модель конструкции в главном окне программного комплекса

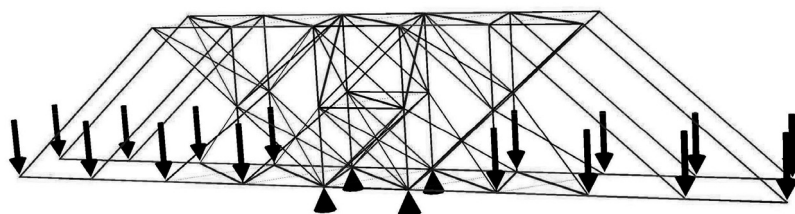


Рис. 2. Тринадцатый шаг структурной оптимизации. Конечная структура

Результаты решения задачи оптимизации структуры конструкции: время решения – 36 с.; количество стержневых элементов – 226 шт.; масса конструкции – 674,234 кг; максимальная перегрузка – 48,66 %; максимальный прогиб – 0,1 % при норме 0,1 %.

Задача оптимизации структуры конструкции была решена в автоматическом режиме. На рис. 2 представлен результат решения задачи оптимизации. Последующее удаление стержневых элементов из конструкции приводит к ухудшению её прочностных свойств, поэтому структура, изображённая на рис. 2, является конечной.

Подобные конструкции могут использоваться в качестве опорных элементов для размещения радиоэлектронных устройств. Масса устройств в данном случае моделируется силовыми воздействиями по направлению вертикальной координатной оси.

Разработанная методика формальной оптимизации конструкций позволяет модифицировать исходную конструкцию, обладающую избыточной массой и структурным составом в более совершенную конечную конструкцию, которая является оптимальной с точки зрения эксплуатационных воздействий и конструкторско-технологических ограничений. Применяемые модель пространственной стержневой системы и программный комплекс позволяют выполнять структурную оптимизацию

конструкций в автоматическом режиме. Это даёт возможность сократить сроки и стоимость проектных работ и программу испытаний проектируемых изделий.

#### Список литературы

1. Курносов В.Е., Покровский В.Г. Предикатная алгебра выбора в задачах проектирования нагруженных конструкций радиоаппаратуры и приборов // Проблемы исследования и проектирования машин: сборник статей Международной научно-технической конференции. – Пенза: ПДЗ, 2005. – С. 23–28.
2. Покровский В.Г. Программный комплекс синтеза конструкций на основе эволюционных дискретных моделей // Современные технологии в машиностроении: сборник статей XII Международной научно-практической конференции. – Пенза: Приволжский дом знаний, 2008. – С. 147–151.
3. Покровский В.Г. Информационные технологии в проектировании несущих конструкций электронной аппаратуры на основе эволюционных дискретных моделей // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс: Научное периодическое издание. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. технол. акад., 2012. – № 05(09). – Пенза, 2012. – С. 198–204.
4. Покровский В.Г. Программный комплекс структурной оптимизации стержневых несущих конструкций на основе импликативной алгебры выбора // Информационные системы и технологии: Научно-технический журнал. – Орёл: ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс» (Госуниверситет – УНПК), 2013. – № 2(76). – С. 251–260.
5. Покровский В.Г. Структурная оптимизация и декомпозиция конструкций электронной аппаратуры на основе эволюционных дискретных моделей // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика: Научный журнал. – Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2016. – № 05(43). – С. 73–82.