

---

**УДК 621.31**

**Оптимизация выбора оборудования для производства бортовых радиотехнических комплексов**

**Дембицкий Н.Л.<sup>1\*</sup>, Луценко А.В.<sup>2</sup>, Фам Вьет Ань<sup>1\*\*</sup>**

<sup>1</sup>*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

<sup>2</sup>*Лианозовский электро-механический завод, ЛЭМЗ, Дмитровское шоссе, 110, Москва, 127411, Россия*

*\*e-mail: [ndembitsky@gmail.com](mailto:ndembitsky@gmail.com)*

*\*\*e-mail: [phamvietanhqs@gmail.com](mailto:phamvietanhqs@gmail.com)*

**Аннотация**

Целью данной работы является создание математического и программного обеспечения для оптимального решения задачи внедрения инновационных технологий с учетом производственно-технологических и экономических критериев и ограничений. В статье рассматривается методика построения математической модели технологического оборудования для производства бортовой радиоаппаратуры летательных аппаратов и метод оптимизации, позволяющие настраивать решение на требования конкретного производства.

**Ключевые слова:** технологический процесс, программный комплекс, оборудование, критерий качества, ограничение, база данных, бортовая радиоаппаратура.

## **Введение**

Современное производство бортовой РЭА летательных аппаратов требует применения дорогостоящего, сложного технологического оборудования и оснастки, специальных помещений и высококвалифицированных специалистов. Внедрение современных инновационных технологий и развертывание нового производства - это комплекс мероприятий по приобретению, развертыванию, освоению и организации эксплуатации сложной техники. В условиях жесткой конкуренции этот процесс должен удовлетворять целому ряду показателей, что не возможно без использования математических методов оптимизации и применения программных средств.

Целью данной работы является создание математического и программного обеспечения для оптимального решения задачи внедрения инновационных технологий с учетом производственно-технологических и экономических критериев и ограничений. В статье рассматривается методика построения математической модели комплекса технологического оборудования и метод оптимизации, позволяющие настраивать решение на требования конкретного производства.

Необходимость разработки программного комплекса обуславливается высокими рисками экономических потерь на этапе планирования закупки оборудования, поскольку стоимость современных технологических установок значительна, а ошибки

принятых технических решений могут сказаться на эффективности и выживании предприятия в условиях жесткой конкуренции. В тоже время создание подобных программных средств теряет свою привлекательность и целесообразность для предприятий из-за высоких финансовых и временных затрат, нехватки специалистов и других причин экономического и технического характера.

Проблема может быть разрешена выпуском универсальных программных средств, которые базируются на обобщенном представлении задачи. При таком подходе, на первый план выдвигается расширение функциональных возможностей программного обеспечения, унификацию математических моделей, алгоритмов и методов, адаптацию задачи к различным производственным потребностям. Только в этом случае становится оправданным разработка подобного программного комплекса.

### **Постановка задачи**

Особенностью выбора оборудования является наличие большого количества факторов, влияющих на оптимальное решение. Исходные данные разработанного программного комплекса включают структуру инновационного технологического процесса, параметры производства, технологического оборудования, требования к его установке и эксплуатации, финансовые ограничения. Причем каждый из перечисленных факторов в зависимости от особенностей производства может быть переведен либо в критерии, либо в ограничения. Отсюда следует, что программный комплекс должен обеспечивать оптимизацию в условиях нечеткого определения

области поиска и неопределенности целевой функции. Поэтому вначале необходимо определить метод оптимизации, наиболее подходящий для класса решаемых задач. Затем разработать универсальные средства приведения исходных данных к требованиям выбранного метода.

Технологический процесс (ТП) производства радиоаппаратуры состоит из согласованной последовательности операций, совершающих механические, физические и другие преобразования полуфабрикатов изделий согласно комплексу заданных выходных параметров готового изделия. Одной из особенностей ТП является вариантность, которая заключается в возможности получения одного и того же результата различными способами обработки. Эта особенность приводит к большому разнообразию оборудования, пригодного для реализации каждой операций. [1]

Допустим, ТП состоит из последовательности  $m$  операций. Каждая технологическая установка, которая использована для реализации  $i$ -ой операции, имеет свои технико-экономические параметры  $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}$  ( $i=1, \dots, m$ ), где  $n$  – количество параметров в унифицированной модели оценки качества выбора оборудования. В состав технико-экономических параметров могут входить такие характеристики, как коэффициент выхода годных изделий с операций, коэффициент использования, производительность, мощность, стоимость, занимаемая площадь оборудования, количество персонала и т.д. Каждая характеристика может быть приняты в качестве и критериев оптимальности (критериев качества) и ограничения.

Обозначим целевую функцию (функцию качества)  $i$ -ой операции  $f(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ . Для каждой  $i$ -ой операции ( $i=1, \dots, m$ ) необходимо найти такой состав оборудования, чтобы обеспечить либо минимум либо максимум значения аддитивной функции качества по всем операциям ТП. Функция качества ТП можно записать как:

$$F(\bar{X}) = \sum_{i=1}^m f(x_{i1}, \dots, x_{in}) \rightarrow \text{ext} \quad (1)$$

где,  $\text{ext}$  — минимум либо максимум значения функции в зависимости от того, что является лучшим,  $\bar{X} = (x_{11}, \dots, x_{mn})$  - вектор параметров технологического оборудования.

В задачах оптимизации на технико-экономические параметры  $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}$  могут накладываться ограничения [2]. Их значения выбраны из области  $D: (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}) \in D$  ( $D = D_0 \times D_1 \times \dots \times D_n$ ). Область  $D$  зависит от технико-экономических требований и формируется совокупностью ограничений типа равенств ( $x_i = x_{i0}$ ), неравенств ( $x_{i\min} \leq x_i \leq x_{i\max}$ ), дискретности  $x_i = (x_1^i, x_2^i, \dots)$ , функциональной связи ( $g_j(\bar{X}) \leq 0$ ).

В данной постановке задача сведена к оптимальному управлению ресурсами и может быть решена методом динамического программирования. Таким образом, требуется разработать программный комплекс на базе метода динамического программирования. Для этого необходимо перейти от модельного уровня описания технологии и технологического оборудования к каноническому представлению математической модели (ММ) метода оптимизации.

## Методика формирования математической модели задачи

На рисунке 1 показана структура подготовки данных для задачи оптимизации выбора оборудования для полупроводникового и микроэлектронного производства.

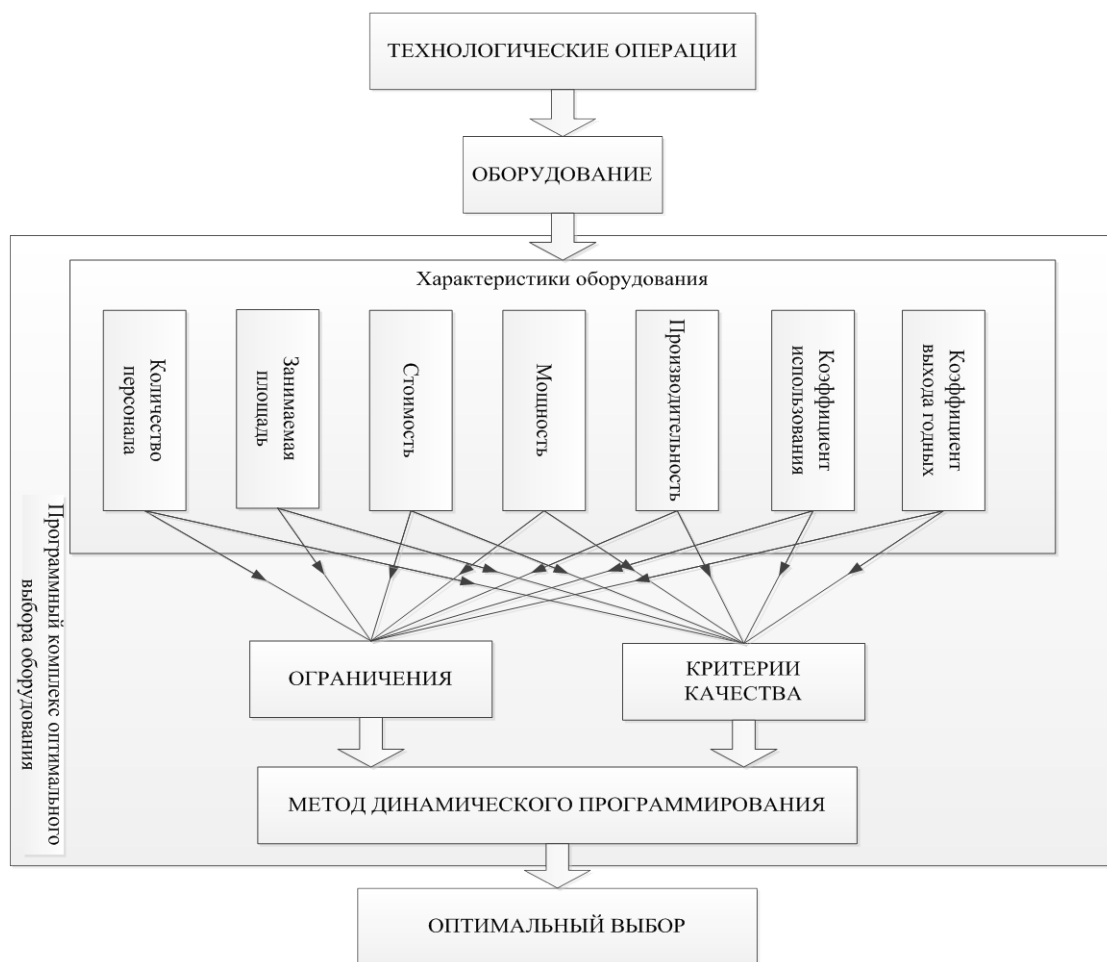


Рисунок 1 - Блок-схема задачи оптимизации выбора технологического оборудования

Технологические установки данного производства характеризуются семью основными параметрами, каждый из которых оказывает влияние на эффективность выбора. В зависимости от потребностей производства, финансовых возможностей, технических и экономических задач меняются условия процесса оптимизации. Каждый

из перечисленных параметров может быть включен либо в функцию качества, либо в ограничения. Кроме этого может меняться состав учитываемых в задаче факторов. Изменения приводят к корректировке аналитических выражений для расчета.

Таким образом, возникает необходимость унификации метода оптимизации путем включения в программный комплекс процедур адаптации ММ под конкретную задачу. Для этого предлагается включить в состав программного комплекса специализированный программный модуль синтеза ММ, который в дальнейшем будем называть конфигуратором математической модели (рисунок 2).

Конфигуратор ММ предназначен для первичной обработки и преобразования исходных данных в стандартную форму представления условий и ограничений метода динамического программирования. В процессе работы он формирует функцию качества  $F(\bar{X})$  и функции ограничений  $G(\bar{X})$ . При формировании функций учитываются требования конкретного производства и требования предприятия.

В качестве генератора формул в конфигураторе применяется оболочка экспертной системы [6], которая в режиме обучения настраивается на исчисление значений функций.

Исходные значения характеристик технологического процесса, оборудования и другие параметры, необходимые для расчетов размещаются в области памяти экспертной системы, называемой доской объявлений. Ячейки доски объявлений подключаются к продукционным правилам. Продукционные правила формируются и вводятся в оболочку на этапе настройки конфигуратора для решения конкретной

задачи. Таким образом, процесс настройки программного комплекса не требует программирования, а связан с вводом аналитических выражений для расчета функции качества и правил расчета ограничений.

Предложенный подход к настройке программного обеспечения на определенную задачу делает процесс адаптации наименее трудоемким, значительно сокращает сроки внедрения программного комплекса и делает его универсальным средством для решения задачи оптимизации выбора технологического оборудования.

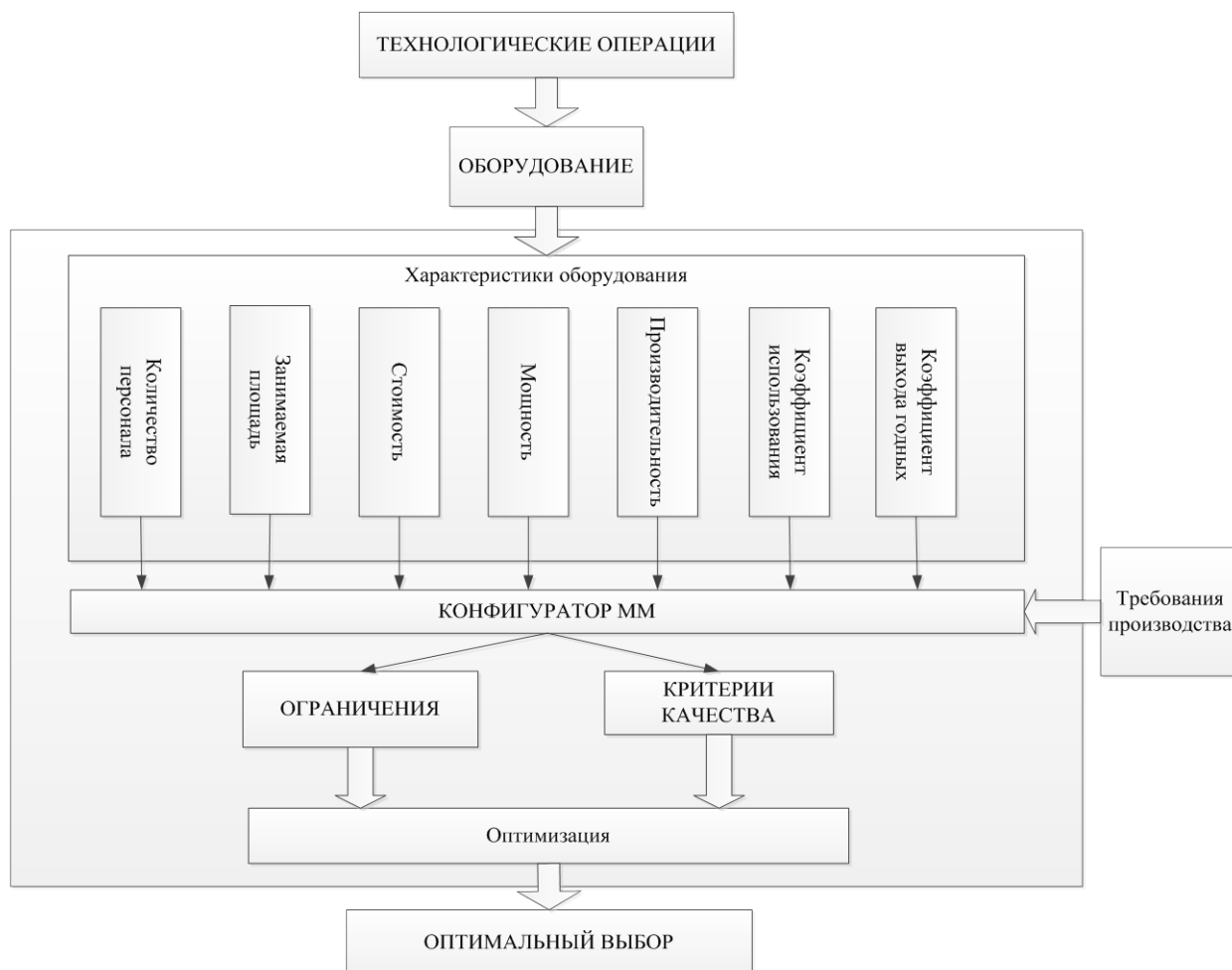


Рисунок 2 - Методика оптимального выбора технологического оборудования



## Алгоритм решения задачи оптимизации

Предположим, что технологический процесс состоит из  $m$  операций. Для каждой  $i$ -й операции необходимо выполнить выбор из  $s_i$  ( $i=1,2,\dots,m$ ) возможных вариантов комплектации оборудованием. ММ задачи можно представить в виде направленного графа (рисунок 3) [1]. Узлы графа – варианты выбора оборудования для реализации одной операции.

Таким образом, задача выбора оптимального варианта ТП – это задача нахождения такого пути на графе, чтобы обеспечить минимум или максимум функции (1).

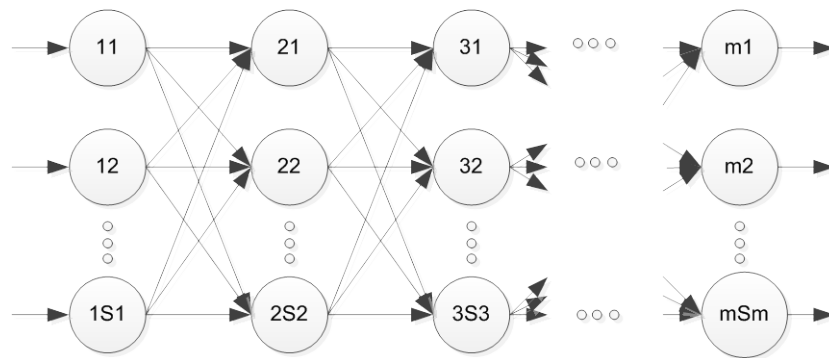


Рисунок 3 - Граф вариантов технологического процесса

Согласно принципу оптимальности Беллмана [3], условные минимумы (максимумы) целевой функции (1) можно определить по следующей формуле:

$$F_i = \min_{(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}) \in D} \{f(x_{i1}, \dots, x_{in}) + F_{i+1}\} \quad (2)$$

$i=1,2,\dots,m$

или

$$F_i = \max_{(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}) \in D} \{f(x_{i1}, \dots, x_{in}) + F_{i+1}\} \quad (3)$$

$i=1,2,\dots,m$

Процесс (алгоритм) оптимизации можно представить в виде блок-схемы (рисунок 4), который включает следующие процедуры подготовки ММ, оптимизации и вывода результатов.

Подготовка ММ состоит из шагов конфигурации, структурирования и ввода данных. При конфигурировании настраивается экспертная система для расчета функций качества и ограничений. Структурирование заключается в формировании стратегии и параметров распределения ресурсов при оптимизации. Ввод данных конкретизирует параметры и состав выбираемого оборудования.

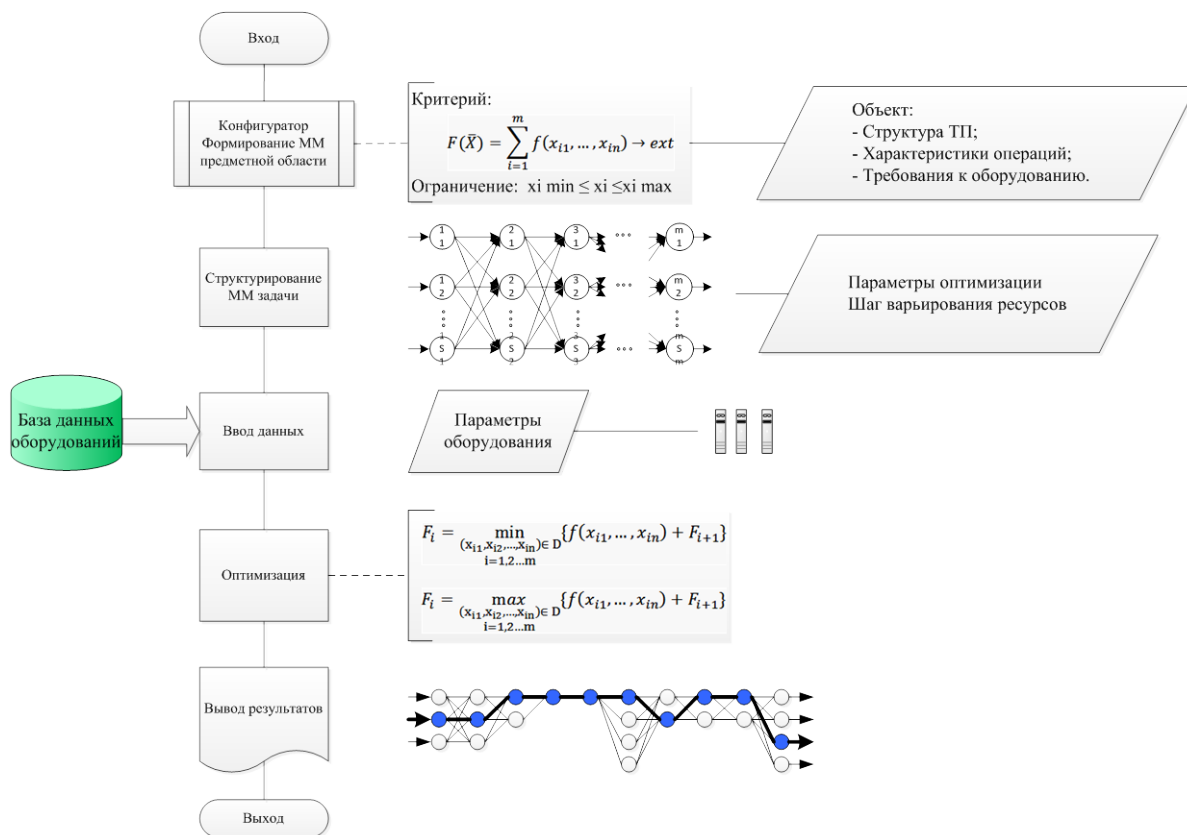


Рисунок 4 - Блок-схема процесса выбора оптимального состава оборудования

## Структура программного комплекса оптимального выбора оборудования

Для решения поставленной задачи разработан программный комплекс оптимального выбора оборудования, структура которого представлен на рисунке 5.

Программный комплекс состоит из двух программных модулей (ПМ). Первый ПМ (конфигуратор математической модели (ММ)), представляющий экспертную систему работает в двух режимах: обучения и решения задачи. Второй ПМ выполняет процедуры оптимизации.

В режиме обучения в конфигуратор ММ загружаются правила расчета функций качества и ограничений. В режиме решения задачи экспертная система выполняет вычисления для процедур ПМ оптимизации.

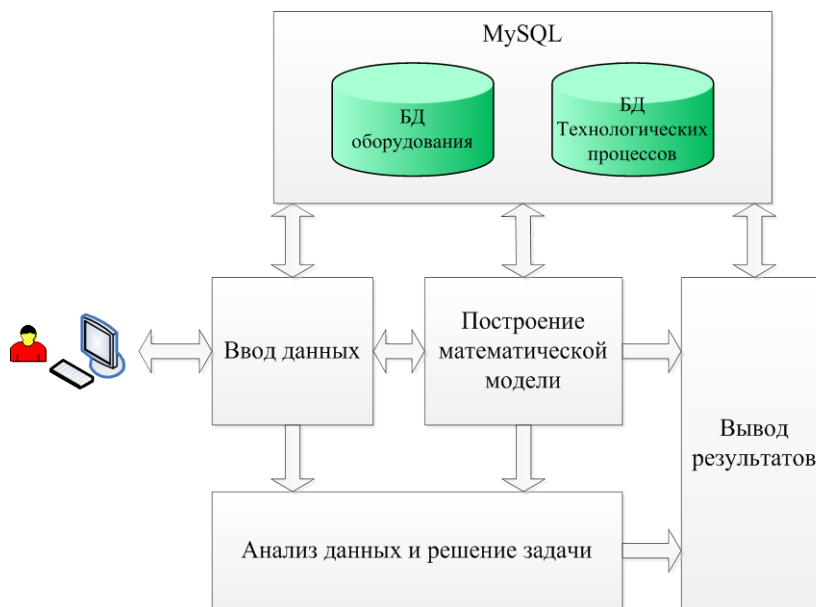


Рисунок 5 - Структура программного комплекса оптимального выбора оборудования

Программный комплекс подключен к базам данных оборудования и ТП, которые управляются системой управления базами данных MySQL. Включение в состав программного комплекса базы данных расширяет его функциональные возможности, позволяя накапливать данные о существующем технологическом оборудовании, хранить типовые модели задачи оптимизации, создавать базу знаний решаемой задачи.

Настройка программного обеспечения и управление алгоритмом оптимизации требует простого и понятного доступа к данным и функциям управления. Для этого был разработан многооконный интерфейс, ориентированный на решаемую задачу (рисунок 6).

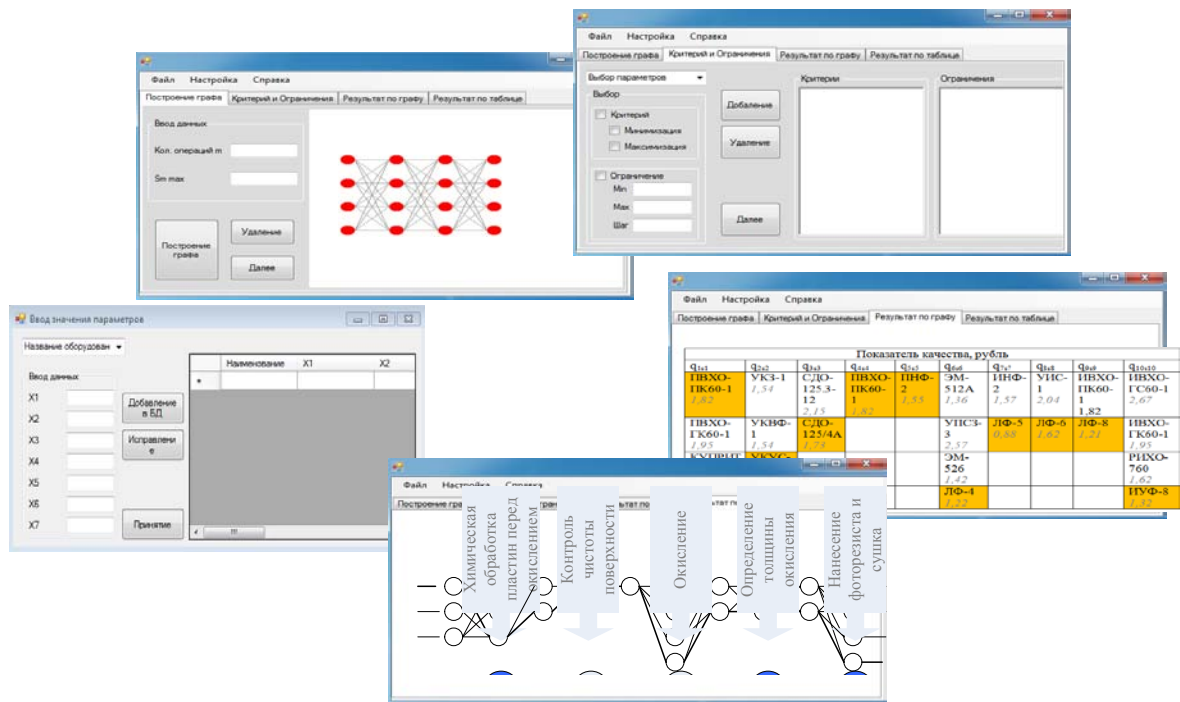


Рисунок 6 - Интерфейс программного комплекса

## Выводы

Создание комплексов технологического оборудования является важнейшим этапом внедрения инновационных технологий, который определяет основные технико-экономические показатели. Автоматизация позволяет проводить многофакторный анализ, учитывать различные аспекты производства, эксплуатации и экономики, получать эффективные решения. Однако разработка специализированного математического и программного обеспечения требует больших капитальных и временных затрат, что не всегда возможно. Рассмотренный в статье подход ориентирован на создание унифицированных программных средств оптимизации выбора технологического оборудования. Разработанный авторами программный комплекс, базируется на применении методов обработки знаний, что позволяет настраивать программное обеспечение на широкий круг задач данного класса и делает его универсальным и полезным средством для организаций, планирующих и осуществляющих модернизацию производства. Также программный комплекс может быть особенно эффективен в момент создания новых производств, поскольку позволит снизить затраты на приобретение оборудования и предложить его оптимальный выбор относительно заданных критериев.

## Библиографический список

1. Сысоев В.В. Автоматизированное проектирование линий и комплексов оборудования полупроводникового и микроэлектронного производства. – М.: Радио и связь, 1982. – 120 с.
2. Боровиков С.М. Математические методы в конструировании и технологии РЭС. - Минск, БГУИР, 2009. – 101 с.
3. Калихман И.Л., Войтенко М.А. Динамическое программирование в примерах и задачах: Учеб.пособие. – М.: Высш. школа, 1979. – 125 с.
4. Оптимизация производственных процессов: <http://merchantconsult.com/>
5. Термины и определения основных понятий. ГОСТ 3.1109-82. - Москва, Издательство стандартов, 2012, - 14 с.
6. Дембицкий Н.Л., Назаров А.В. Применение методов искусственного интеллекта в проектировании и производстве РТУ. – М.: МАИ, 2009.– 228 с.