

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРОЕКТИРУЕМЫХ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

В работе рассмотрен подход к оптимизации в режиме виртуального моделирования параметров и характеристик многокомпонентных изделий машиностроения при отсутствии непосредственного доступа к математическим моделям процесса. Приведен пример практической реализации подхода – определение характеристик передней подвески самоходного транспортного средства, моделируемого в САЕ-среде CosmosMotion. Алгоритм может быть реализован в виде отдельного модуля или программного модуля, встроенного в САД-среду.

Одним из основных направлений создания высокоэффективных изделий машиностроения является формирование на этапе проектирования такого набора их свойств (параметров и характеристик), который обеспечивает удовлетворение совокупности противоречивых требований многорежимных условий эксплуатации.

В настоящее время наблюдается существенная переориентация исследовательской и проектной частей работ от физического моделирования изделий и режимов их функционирования к использованию в этих целях систем виртуального моделирования. Такие системы в совокупности с присущими им инструментами располагают процедурами оптимизации параметров (статических свойств) моделируемых систем на основе методов нелинейного программирования и математической теории планирования экспериментов. Формирование характеристик разрабатываемых изделий машиностроения (динамических свойств) с помощью подобного инструментария в существующих системах виртуального моделирования не предусмотрено, что снижает их инструментальный потенциал. Вместе с тем имеется возможность решения частных задач расчета характеристик при задании фиксированных значений параметров моделируемого изделия. Это, при наличии дополнительного инструментария, позволяет перейти в режим автоматизированного формирования рационального набора характеристик многокомпонентных изделий машиностроения.

Одной из особенностей современных систем моделирования является автоматическое формирование динамической модели изделия по ее сборке. При этом сама модель скрыта от пользователя и недоступна ему.

В этих случаях для пользователя остаются доступными:

- функции добавления и удаления новых блоков модели;
- изменение числа степеней свободы для тел модели;
- изменение числовых характеристик параметров модели (материала, геометрии);
- изменение функций силового воздействия на элементы модели как внутреннего, так и внешнего характера.

Естественно полагать, что при наличии таких возможностей формирование характеристик изделия целесообразно проводить на основе численного эксперимента в ограниченной области варьирования параметров и функций системы с целью получения явной модели процесса, обеспечивающей его дальнейшее исследование.

В подобных ситуациях предпочтительными являются планы экспериментов, имеющие стабильную (регулярную) структуру независимо от числа варьируемых параметров. Это дает возможность формировать такие планы в автоматизированном режиме, а также проводить построение регрессионной модели процесса и оптимизировать на ее основе набор исследуемых параметров и характеристик процессов. Регулярностью структур обладают, например, планы полного факторного эксперимента (число параметров не ограничено), планы второго порядка Рехтшафнера (число параметров не ограничено), Бокса-Дрейпера (при числе параметров от 2 до 15), планы на основе гипер-греко-латинских квадратов (число параметров не ограничено). Число минимально необходимых экспериментов существенно снижается по индексу перечисленных планов.

В большинстве технических приложений область оптимума достаточно точно аппроксимируется полиномами второй степени, например вида

$$Y = B_0 + \sum_{i=1}^N eiXi + \sum_{i=1}^N eiiXiXi + \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N BijXiXj.$$

Соответствующие такой форме модели планы Рехтшафнера являются насыщенными (число экспериментов равно числу членов в уравнении регрессии) и представляют собой выборки строк полного факторного эксперимента на трех уровнях [1]. Способ их построения ясен из таблицы 1.

Таблица 1

Структура планов Рехтшафнера

Номер множества	Точки множества	Число опытов множества
I	(-1, ..., -1) для всех k	1
II	(-1, 1, ..., 1) для всех k	k
III	(-1, -1, 1) для $k = 3$ (1, 1, -1, ..., -1) для $k > 3$	$(k-1)k/2$
IV	(1, 0, 0, ..., 0) для всех	k

Алгоритм планирования и проведения эксперимента может быть реализован в двух вариантах: непосредственно в модуле системы автоматизированного моделирования многокомпонентных изделий с использованием API-программирования; в виде самостоятельного модуля, взаимодействующего с системой моделирования посредством двунаправленной передачи данных расчетов. При этом используется следующая последовательность работ:

- формирование твердотельной модели многокомпонентного проектируемого изделия;
- формулирование цели эксперимента и ограничений на параметры и характеристики процесса;
- задание (указание в модели) числа и типажа варьируемых параметров изделия;
- формирование плана эксперимента и расширенной матрицы планирования;
- определение и фиксация характеристик исследуемого изделия и ограничений с набором параметров, соответствующих строкам плана эксперимента;

- расчет коэффициентов уравнений регрессии для численного описания области значений исследуемых характеристик;
- определение значений исследуемых характеристик, удовлетворяющих совокупности противоречивых требований к разрабатываемому изделию;
- верификация значений характеристик процесса с полученным набором параметров изделия.

Алгоритм реализуется для всех основных режимов функционирования изделия, что обеспечивает необходимый информационный банк для последующих решений по доработке конструктивных схем элементов и сборок с точки зрения управления их свойствами: ступенчатое конструктивное переключение по режимам функционирования; адаптивное изменение свойств с использованием следящих систем управления.

Многорежимность функционирования изделия приводит к необходимости формирования компромиссного варианта решения, в наибольшей степени удовлетворяющего всей совокупности противоречивых требований к проектируемому изделию. По этой причине в предпоследнем пункте алгоритма следует использовать интегральный критерий качества процесса, исключающий возможность компенсации потери качества одних показателей высоким качеством других показателей. Его использование должно основываться на принципе Парето, что обеспечивает возможность сведения задачи с множеством частных критериев к задаче с одним интегральным критерием качества. При этом значения весовых коэффициентов частных критериев можно определять и уточнять автоматически в ходе решения задачи.

Определение системы весовых коэффициентов и ранжирование по ней решений из области Парето приводит к получению оптимального компромиссного варианта, сбалансированного по противоречивости частных критериев. При этом интегральный показатель качества может представляться следующим образом [2]:

$$\text{если } \varphi_i \rightarrow \min, \text{ то } K = \left(\sum \omega_i^2 (\varphi_i / \varphi_{i \min} - 1)^2 \right)^{1/2};$$

$$\text{если } \varphi_i \rightarrow \max, \text{ то } K = \left(\sum \omega_i^2 (\varphi_{i \max} / \varphi_i - 1)^2 \right)^{1/2}.$$

Здесь φ и ω – частные критерии качества и их «весовые» значения.

Квадратичная форма записи обеспечивает наличие «прогиба» – точки компромиссного проекта. Весовые коэффициенты определяются и уточняются в ходе решения задачи автоматически, путем последовательного сужения интервала варьирования искомых параметров около точки оптимума (прогиба), т.к. «веса» являются функцией ширины участка варьирования.

Искомый вектор частных критериев W является нормалью к поверхности Парето. Его поиск и определение оптимального решения проводится в следующей последовательности:

- проводится минимизация отдельно по каждому критерию качества (например, $\varphi_{1 \min}$), остальные частные критерии вычисляются с учетом полученных таким образом параметров модели ($\varphi_1 | \varphi_{1 \min}$);
- по результатам частных оптимизаций формируется матрица Φ .

Это дает возможность определить область возможных изменений частных критериев.

Матрица частных критериев Φ связана с вектором весов W соотношением

$$\Phi^T W = e,$$

где $e^T = [1, 1, \dots, 1]$ – единичный вектор.

Это соотношение позволяет определить веса частных критериев:

$$W = (\Phi^T)^{-1} e.$$

С найденным вектором W проводится минимизация интегрального критерия качества. Расчеты проводят до момента выполнения условий

$$K_j - K_{j+1} \leq \varepsilon; g_j \leq [g_j],$$

где ε – заданная точность расчета критерия K (1, 5, 10 %); $[g_j]$ – ограничения на варьируемые параметры.

Рассмотренный подход использован для анализа и оценки динамических характеристик поверхностного разрыхлителя почвы, конструктивная схема которого показана на рисунке 1.

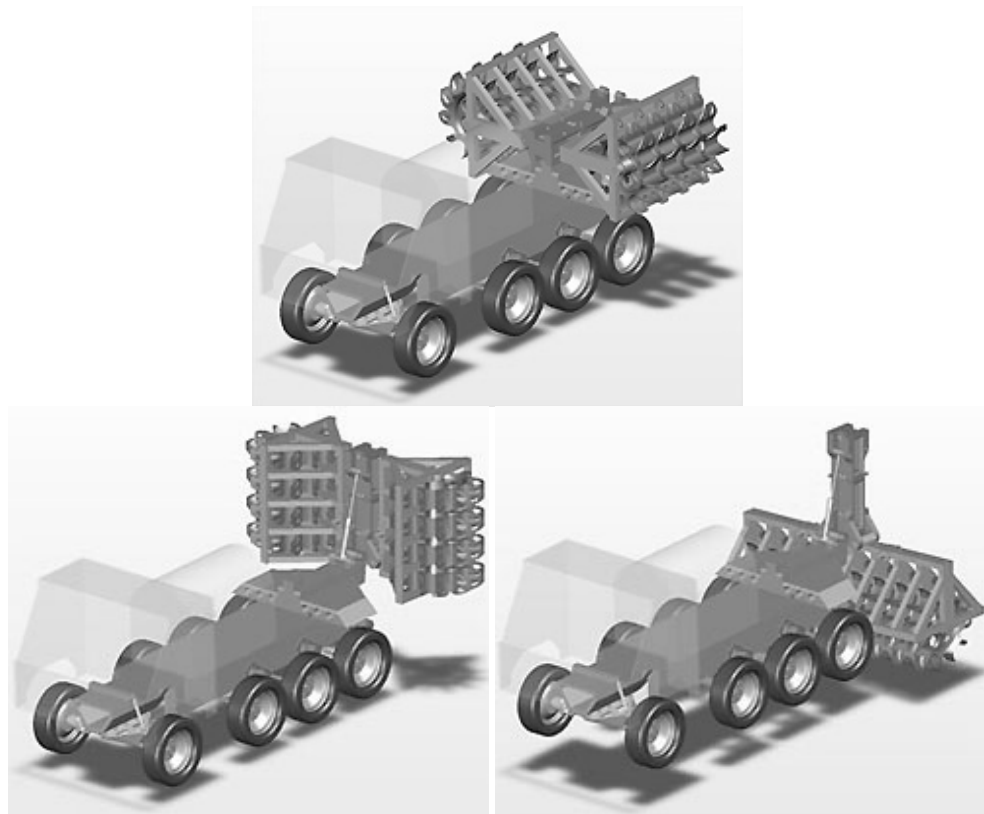


Рис. 1 Конструктивная схема

Самоходная база содержит платформу, на которой размещаются силовой агрегат, гидропривод, трансмиссия, ходовая часть, системы управления и торможения движения. К задней части платформы шарнирно крепится стойка с двумя пакетами фрез (рис. 1).

При подготовке к непосредственной работе стойка с пакетами фрез переводится силовым гидроцилиндром в вертикальное положение, пакеты фрез устанавливаются в горизонтальное положение. Перевод в рабочее положение осуществляется автоматически посредством гидропривода и системы его управления.

В верхней части самоходной платформы размещается двигатель и кабина водителя. В нижней части размещаются передняя и задняя подвески, элементы силового привода, элементы систем обеспечения. Задняя независимая торсионная подвеска содержит шесть элементов, которые крепятся в бортах платформы по три в ряд. Исполнительные элементы собраны в два пакета по четыре движителя-фрезы. В положении для движения пакеты скреплены со стойкой и опущены на платформу.

Для проведения исследований использован модуль COSMOSMotion, пакета SolidWorks. Модуль обеспечивает автоматическое формирование модели процессов функционирования изделия по данным сборки конструкции. При этом пользователь в любой момент может добавить любой шарнир или отредактировать существующий. Результаты моделирования отражаются в виде графиков и сопровождаются анимированным воспроизведением характера перемещения элементов конструкции.

Расчетная схема изделия показана на рисунке 2.

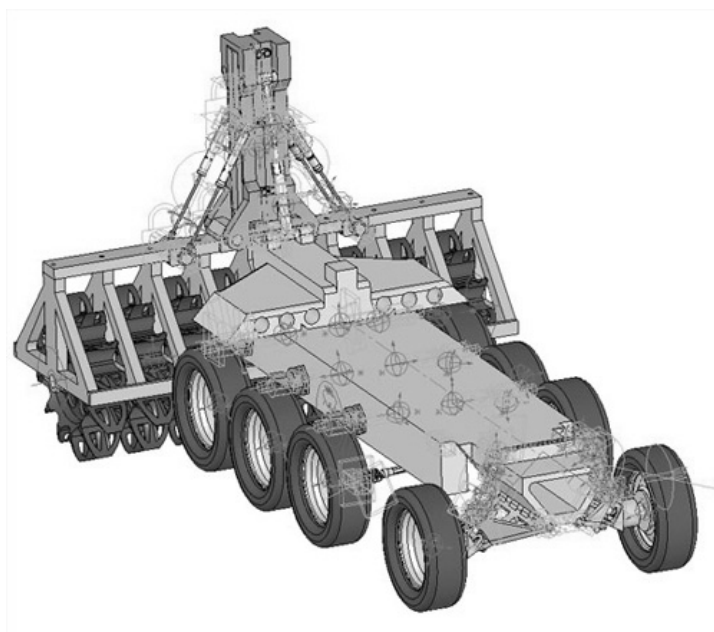


Рис. 2 Расчетная схема

Цель исследования: минимизация скоростей и ускорений балансиров передней подвески – снижение силовых нагрузок на водителя и приборы, расположенные в передней части изделия.

Параметры оптимизации:

- X_1 – жесткость правого балансира, Н·с/мм (200...700);
- X_2 – жесткость левого балансира, Н·с/мм (200...700);
- X_3 – предварительное поджатие правого балансира, Н (100...500);
- X_4 – предварительное поджатие левого балансира, Н (100...500).

При решении задачи использован алгоритм исследования, выполненный по второму варианту – в виде самостоятельного модуля, взаимодействующего с системой моделирования посредством двунаправленной передачи данных расчетов. Алгоритм реализован в системе MathCAD и содержит следующие процедуры:

- формирование плана и расширенной матрицы планирования;
- экспорт значений параметров и импорт значений характеристик, получаемых в модуле CosmosMotion;
- расчет значений коэффициентов уравнения регрессии;
- формирование значений начальных точек расчета в интервале $-1...+1$;
- перевод кодированных значений оптимизируемых параметров в реальные значения;
- перевод реальных значений оптимизируемых параметров в кодированные значения;
- расчет значения частного критерия качества;
- расчеты значения частного критерия качества в узлах плана;
- поиск оптимума (использован метод покоординатного спуска с обучением [3]);
- определение оптимальных значений параметров в кодированном и натуральном видах представления;
- управления порядком расчетов и раскодирования параметров.

Расширенная матрица планирования для условий задачи показана на рисунке 3, столбцы с 6 по 9 являются элементами матрицы планирования.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1
5	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1
6	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1
7	1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1
8	1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
9	1	1	1	1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1
10	1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1
11	1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1
12	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
14	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
15	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

Рис. 3

Схемы силового нагружения элементов подвесок исследуемого изделия показаны на рисунке 4.

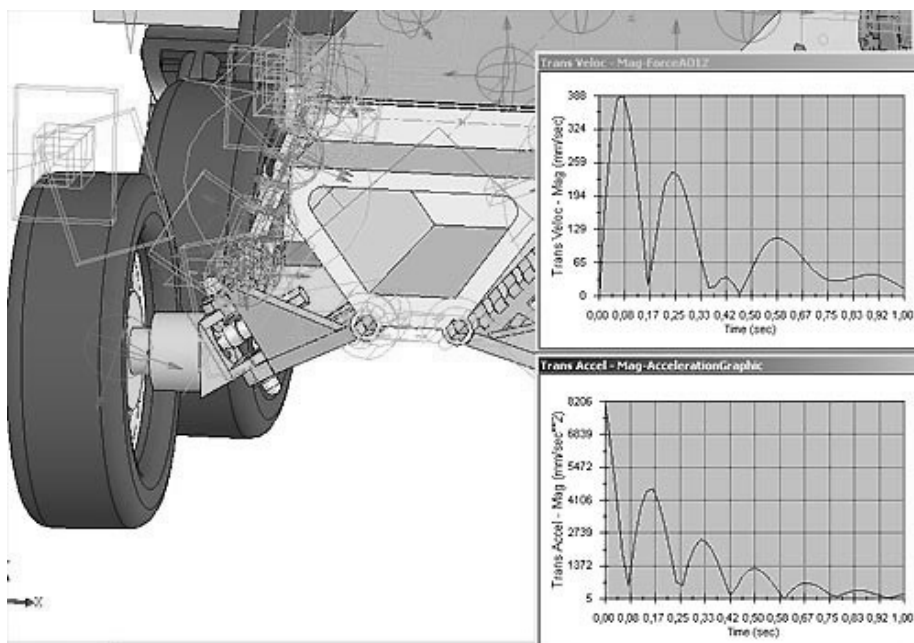


Рис. 4 Схемы силового нагружения

Типовые результаты моделирования первых двух строк плана показаны на рисунках 5, 6 соответственно для правого и левого балансиров передней подвески.

Разнотипность характеристик процесса обусловлена разными режимами силового воздействия от неровностей дороги.

На основе полученных данных построены четыре уравнения регрессии, описывающие в заданных начальных условиях характер изменения скоростей и ускорений правого и левого балансиров передней подвески. Коэффициенты уравнений регрессии сведены в таблицу 2.

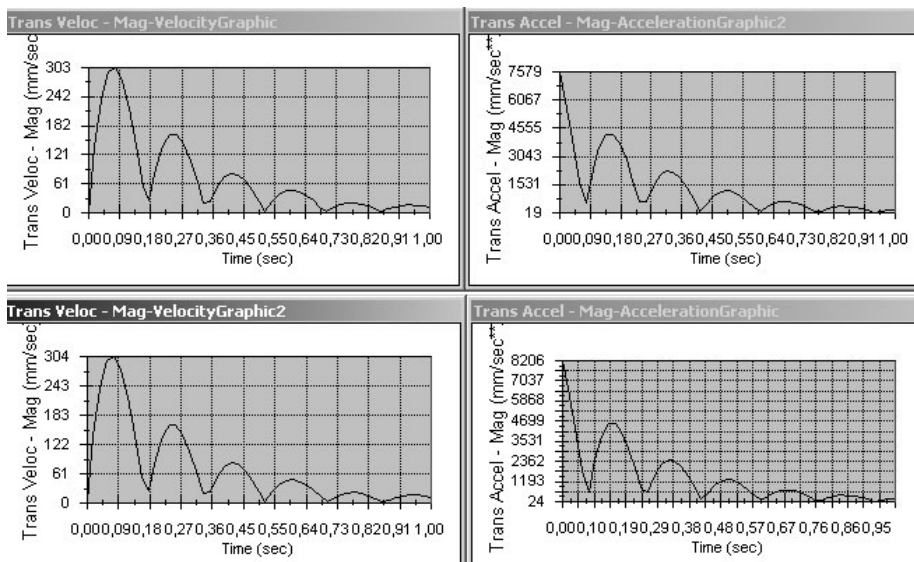


Рис. 5

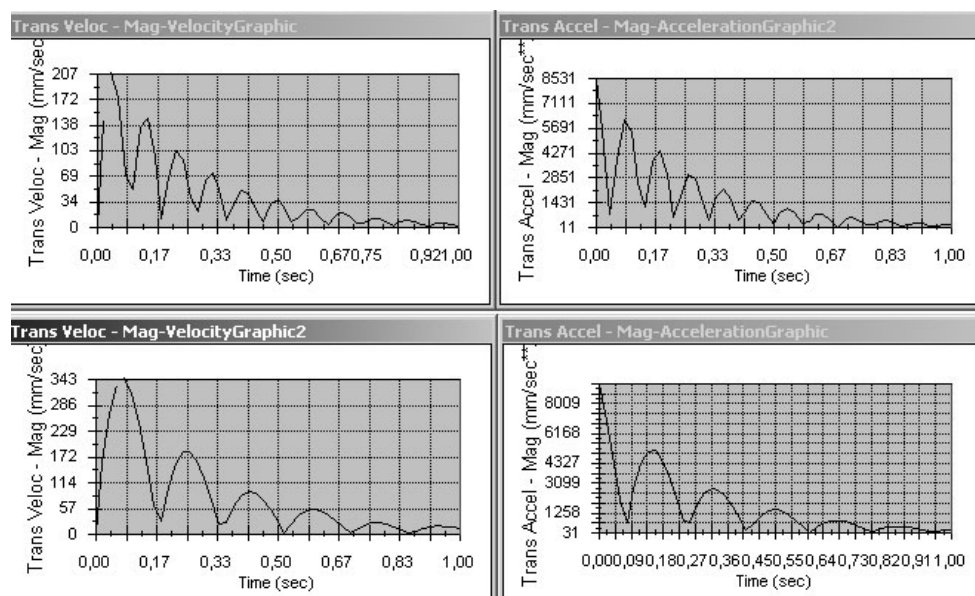


Рис. 6

Таблица 2

Значения коэффициентов уравнений регрессии

Коэффициенты	Скорость правого балансира	Скорость левого балансира	Ускорение правого балансира	Ускорение левого балансира
B_0	212,8	217,2	7365	8145
B_1^2	4,428	17,248	-414	-25,8
B_2^2	-12,82	13,247	504,5	-169,2
B_3^2	39,171	12	537,5	-128,2
B_4^2	7,419	-9,486	-207,66	417,06
B_1	-1,247	-61,493	159,36	-68,7
B_2	4,001	15,503	185,85	237,8
B_3	-57	-9,242	-270,14	-261,3
B_4	11,763	1,242	523,01	158,5
B_{12}	2,744	-12,012	-224	211,03
B_{13}	-4	3,246	60,2	254,515
B_{14}	8,016	-3,764	125,02	-231,96
B_{23}	-5,009	3,264	60,181	175,693
B_{24}	3,756	-1,244	99	-301,78
B_{34}	4,003	9,274	271,3	-74,528

Частной оптимизацией ускорений правого и левого балансира передней подвески получены следующие значения.

Правый балансир:

- $a_n = 7044$ – минимум ускорения правого балансира, мм/с;
- $X_1 = 225$ – жесткость правого балансира, Н·с/мм;
- $X_2 = 693$ – жесткость левого балансира, Н·с/мм;
- $X_3 = 110$ – сила предварительного поджатия правого балансира, Н;
- $X_4 = 117$ – сила предварительного поджатия левого балансира, Н.

Левый балансир:

- $a_d = 6095$ – минимум ускорения левого балансира, мм/с;
- $X_1 = 207$ – жесткость правого балансира, Н·с/мм;
- $X_2 = 546$ – жесткость левого балансира, Н·с/мм;
- $X_3 = 302$ – сила предварительного поджатия правого балансира, Н;
- $X_4 = 107$ – сила предварительного поджатия левого балансира, Н.

Полученные значения параметров используются для уточнения конструкции подвески и принципов управления ее характеристиками с учетом перечня режимов функционирования.

Рассмотренный подход к автоматизации процесса проектирования параметров и характеристик изделий машиностроения реально обеспечивает возможность расширения классов задач, решаемых разработчиками в рамках единого информационного и временного пространства, является конкретным инструментом обеспечения качества в соответствии с комплексом противоречивых требований по условиям функционирования.

Список литературы

1. **Новик, Ф. С.** Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов. – М. : Машиностроение ; София : Техника. – 1980. – 304 с.
2. **Петренко, А. И.** Основы автоматизации проектирования / А. И. Петренко. – Киев : Техника, 1982. – 296 с.
3. **Гоминтерн, В. И.** Методы оптимального проектирования / В. И. Гоминтерн, Б. М. Каган. – М. : Энергия, 1980. – 160 с.