

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВ ИММЕРСИОННОЙ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ ЛИТОГРАФИИ

П.С. Костомаров
НИУ ВШЭ,

Факультет электроники
и телекоммуникаций МИЭМ НИУ ВШЭ

При выборе структуры устройства иммерсионной ультрафиолетовой литографии (УИУФЛ) проектирования необходимо определить его конструктивные параметры исходя из норм ТП, а также условий эксплуатации. Для решения подобной задачи требуется единая вычислительная среда, а также единство методологии и математического обеспечения служащих для описания структуры. Процесс проектирования должен быть предельно формализован, т. е. на каждом уровне САПР должны решаться задачи сформулированные одинаково [1].

Определение задачи математического программирования для проектирования УИУФЛ

УИУФЛ может быть описано единым набором изменяемых параметров $X = (x_1, \dots, x_n)$, которые могут изменять свои значения в $a_i \leq x_i \leq b_i, i = 1, \dots, n$ (ограничения на a_i и b_i не жесткие).

В математической модели УИУФЛ для каждого набора значений формируется критерий качества $f(x)$, накладываются дополнительные ограничения $g_j(X) \geq 0, j = 1, \dots, m$.

Задача сводится к поиску оптимальных параметров УИУФЛ, т. е. нахождению такого их набора, который будет удовлетворять приведенным ограничениям, а следовательно, обеспечит достижение глобального экстремума по критерию качества.

Задача математического программирования для проектирования УИУФЛ в n -мерном пространстве сводится к нахождению точки $X^* \in$ области определения D , такой что $F(X^*) = \min_{X \in D} F(X)$.

В реальных условиях на часть переменных или на все из них будут наложены условия дискретности или целочисленности. Такие условия связывают область поиска D , а сама задача параметрической оптимизации становится многоэкстремальной.

Из множества S подмножества всех допустимых структур $\{S_1, \dots, S_m\}$, согласно известному алгоритму, осуществляется выбор набора параметров, который будет удовлетворять заданным ограничениям. Для структуры S_j ($j = 1, \dots, m$) можно задать пространство переменных $\bar{X}_j = (x_{1j}^j, \dots, x_{n_jj}^j)$, $j = 1, \dots, m$, и по единственному критерию качества найти допустимые оптимальные параметры структуры S_j . Оптимальные значения параметров структуры S_j обозначим через X_j^* .

Имеется m n_j -мерных ограничений $a_i^j \leq x_i^j \leq b_i^j, i = 1, \dots, n_j, j = 1, \dots, m$, как с непрерывным, так и с дискретным характером изменения переменных \bar{X}_i^j . По единственному критерию качества задана целевая функция $f = f^j(\bar{X}_j)$, $j = 1, \dots, m$, и система ограничений $g_r^j(\bar{X}_j) \geq 0, r = 1, \dots, p_j, j = 1, \dots, m$.

Необходимо отыскать точку \bar{X}_j^* , принадлежащую j^* -му пространству ограничений, для которого [2]

$$\left. \begin{aligned} f^{j^*}(\bar{X}_j^*) &= \min f^j(\bar{X}_j^*); \\ g_r^{j^*}(\bar{X}_j^*) &\geq 0, \quad r = 1, \dots, p_j^*; \\ 1 &\leq j \leq m. \end{aligned} \right\}$$

Нахождение глобально-оптимальной структуры и глобально-оптимальных значений переменных внутри этой структуры – задача структурно-параметрической оптимизации.

Рекомендуемый алгоритм случайного поиска в подпространствах можно записать в виде следующих рекуррентных выражений:

$$\bar{X}_{i+1} = \bar{X}_i + \Delta \bar{X}_{i+1};$$

$$\bar{X}_i = \bar{X}_{i-h} \text{ при } [f(\bar{X}_{i-1}) < f(\bar{X}_i)] \vee [g(\bar{X}_i) < 0].$$

Здесь h – число последовательно неудачных шагов поиска; $\Delta \bar{X}_{i+1}$ можно определить по формуле [3]

$$\Delta X_{i+1} = \begin{cases} a \bar{\xi}_{i+1} \text{ при } (i = 1) \vee (|\bar{X}_{i-1}| = |\Delta \bar{X}_{i-1}| \wedge (h > 1)); \\ \Delta \bar{X}_i \text{ при } [f(\bar{X}_{i-1}) \geq f(\bar{X}_i)] \wedge [g(\bar{X}_i) \geq 0]; \\ -\Delta \bar{X}_i \text{ при } (|\Delta \bar{X}_i| \neq |\Delta \bar{X}_{i-1}|) \wedge (h \geq 1); \end{cases}$$

где a – максимальная величина рабочего шага поиска; $\bar{\xi}_{i+1}$ – вектор случайных чисел; $\Delta \bar{X}_{i-1}, \Delta \bar{X}_i, \Delta \bar{X}_{i+1}$ – векторы приращений на $(i-1)$ -, i -, $(i+1)$ -м шагах поиска; $\bar{X}_i, \bar{X}_{i+1}, \bar{X}_{i-1}$ – векторы, описанные набором переменных УИУФЛ; $f(\bar{X}_{i-1}), f(\bar{X}_i), f(\bar{X}_{i+1})$ – значения критериев качества после осуществления $i-1$ -, i -, $i+1$ -м шагов поиска.

Вектор случайных чисел

$$\bar{\xi}_{i+1} = (0, \dots, 0, \xi_k^{i+1}, \xi_{k+1}^{i+1}, \dots, \xi_l^{i+1}, 0, \dots, 0);$$

$$\bar{\xi}_k^{i+1} = \xi_{k+1}^{i+1} = \dots = \xi_k^{i+1} = \psi,$$

где ψ – случайное равномерно распределенное число, выбираемое из интервала $[-1, 1]$; k и l – случайные целые числа, распределенные на отрезке $[1, n]$ и упорядоченные соотношением $k \leq l$.

Приведенный алгоритм случайного поиска имеет также смысл использовать самостоятельно, а не как процедуру шага локального поиска в алгоритме глобального поиска. Более целесообразно работать только с локальным алгоритмом, чтобы почувствовать и ощутить существование сложной многомерной многоэкстремальной поверхности решений.

После решения задачи математического программирования для проектирования УИУФЛ инженерам необходимо внести изменения в техническое задание (ТЗ) в соответствии с выявленными параметрами оптимизации. Более подробно рассмотрим данную процедуру на примере ТЗ на проектирование звеньев ультрафиолетового тракта (УФТ).

Корректировка ТЗ проектируемого УИУФЛ

Схемотехнический уровень САПР должен обеспечивать выработку ТЗ на проектирование звеньев УФТ по известному ТЗ на объект проектирования в целом. Для выполнения такой работы необходимо:

1. состав проектируемого УФТ;
2. определить структуру изменяемой части УФТ;
3. установить закон сканирования и функцию пропускания анализатора изображения в УФТ (если анализатор предусмотрен);
4. провести согласование функционирования звеньев УФТ для минимизации возможных искажений преобразованного сигнала и повышения соотношения сигнал/шум;
5. выбрать конструктивные параметры УФТ (длину волны источника ультрафиолетового излучения λ , интенсивность ультрафиолетового излучения и т. д.), значения которых обеспечивали бы получение необходимого технического процесса в соответствии с ТЗ [4].

Проведение концептуального анализа УИУФЛ предполагает разрешение следующего ряда проблем:

- разделение УИУФЛ на типовые элементы и основные узлы (ОУ);
- определение свойств выделенных элементов, а также параметров и признаков их характеризующих;

- нахождение всех взаимосвязей свойств УИУФЛ и ее типовых элементов;
- построение на основе найденных зависимостей свойств математических моделей функционирования УИУФЛ в целом и ее ОУ в частности, существенных целей и критериев;
- определение значимых для процесса извлечения знаний признаков и свойств описания УФТ.

Целесообразность решения поставленных задач требует формирования четко структурированного описания УИУФЛ в виде системной модели, разносторонне раскрывающей все аспекты необходимые для его качественного проектирования.

Задача синтеза ультрафиолетового тракта

Задача синтеза ультрафиолетового тракта заключается в определении взаимосвязи компонентов системы, идентификации этих компонентов и определении значений их конструктивных параметров.

При решении задачи синтеза на схемотехническом уровне по этим исходным данным необходимо:

- определить, какие звенья и в какой последовательности образуют УФТ проектируемого процесса;
- установить по каким законам и какими детекторами осуществляется анализ экспонируемого изображения;
- сформулировать требования к каждому из звеньев УФТ;
- выбрать изменяемую часть УФТ [3].

Как видно из анализа поставленных задач, синтез УФТ на схемотехническом уровне обеспечивает решение всей задачи проектирования на данном уровне. Однако решение задачи синтеза на системотехническом уровне в такой постановке невозможно по нескольким причинам:

1. не возможности составить ТЗ, которое будет полностью учитывать настоящий уровень;
2. УФТ может быть существенно нелинейным, а для синтеза нелинейных систем в настоящее время нет полностью удовлетворяющего математического аппарата.

Если работу УФТ описать линейным оператором, то получится уравнение $L\{x, y, z, \lambda, t, \theta, \gamma, \dots\} = u_{\text{вых}}(t)$, где L – яркое поле в пространстве предметов; $u_{\text{вых}}$ – сигнал на выходе УФТ.

Следовательно, пространства входных и выходных сигналов неизоморфны, и управление, которое необходимо решать относительно ядра преобразования L , недоопределено. Такая задача относится к классу существенно некорректных.

Более упрощенная постановка задачи синтеза возможна, если рациональным образом распределить функции между инженером проектировщиком процесса и ЭВМ, а также наложить ряд дополнительных ограничений на объект проектирования.

В ТЗ оговаривается, что элементы УФТ входящие в объект проектирования, должны иметь показатели качества, соответствующие настоящему уровню развития техники, т. е. быть технологически реализуемыми. В подавляющем большинстве случаев это ограничение вводится и при традиционных методах проектирования.

УФТ линейно преобразует входной сигнал и выходной: если на входе присутствует сигнал, описываемый функцией

$$F_1(r) = \sum_{i=1}^{\infty} f_{1i}(r),$$

где r – вектор в соответствующих x_j координатах, то сигнал на выходе после преобразования описывается так:

$$F_2\{r\} = L\{F_1(r)\} = \sum_{i=1}^{\infty} L\{f_{1i}(r)\}.$$

Проектирование существенно нелинейных УФТ удобнее всего вести по следующей методике:

- осуществить линейризацию связи вход-выход, т. е. выбирают условия, при которых в пределах малых изменений входного сигнала объект проектирования выполняет линейное преобразование;

- выбрать звенья УФТ и изменяемую часть устройства, иными словами, определить общую компоновку компоновку объекта проектирования;

- определить конструктивные параметры звеньев, входящих в состав объекта проектирования, для каждого изменения входного сигнала, в пределах которого УФТ линеен;

- выбрать элемент (также возможное варианты добавления элемента) УФТ, конструктивные параметры которого зависят от изменения входного сигнала. Этот элемент и создает нелинейность характеристик УФТ [5].

ТЗ на форму выходного временного сигнала УФТ должно быть составлено с учетом возможности представления его в некоторой эквивалентной пространственной форме. Такая перестройка формы сигнала осуществляется за счет изменения системы координат. В общем виде преобразование временного сигнала $u(t)$ в пространственный описывается выражением $E(x, y) = \Omega u(t_a)$, где $x = x(t_a)$, $y = y(t_a)$ – параметрическая запись закона, с помощью которого каждому значению t_a ставятся в соответствие координаты x, y положения безразмерной сканирующей апертуры; Ω – коэффициент пропорциональности [6].

Список литературы:

1. Лазарев Л. П., Колючкин В. Я., Метелкин А. Н. Автоматизация проектирования оптико-электронных приборов : учеб. пособие для вузов / Лазарев Л. П., Колючкин В. Я., Метелкин А. Н.; общ. ред. Лазарева Л. П. – М. : Машиностроение, 1986. – 216 с.
2. Половинкин А. И., Вершинин Н. И., Зверева Т. И. Функционально-физический метод поискового конструирования / Учебно-методическое пособие. Иваново: ИЭИ, 1983. 83с.
3. Богданов Г. М., Половинкин А. И. Об одном подходе к задаче компоновки технических систем // Управляющие системы и машины, 1983, № 2, с. 24 – 27.
4. Балан Н. Н., Васин В. А., Ивашов Е. Н., Костомаров П. С., Степанчиков С. В. Критерий качества в автоматизированном проектировании устройств оборудования иммерсионной литографии // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2012. № 3. С. 69-77.
5. Солодовников В. В. Теория автоматического регулирования. В 3-х кн. М.: Машиностроение. Кн. 1, 1967. 768 с.
6. Солодовников В. В. Теория автоматического регулирования. В 3-х кн. М.: Машиностроение. Кн. 3, ч. II, 1969. 368 с.