

СОВРЕМЕННЫЕ ВИДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

О. ПЕТРИК, З. ТУРИ, Л. ЧЕР и П. КАЛЛО

Кафедра точной механики и оптики
Будапештского технического университета,

Н-1521 Будапешт

Поступило: 7 марта 1983 г.

Summary

Special performance, and design pattern of complex instruments having optical, electronical and precision-mechanical parts are described. Some useful initial data sets for the optical subsystem design are evaluated. Computer applications are shown for calculating optical parts and systems, especially for compensating of the difference aberrations. The solution of the reflection and glittering problems are investigated experimentally and by calculations. The results are presented via computer graphics. Using a complex structure promotes to answer difficult problems instead of expensive homogeneous structure.

Исследовательская работа и технический прогресс предъявляют все более высокие требования и к механическому приборостроению. Очень редко бывает при исследовании, что достаточно измерения одной величины. Задача в основном заключается в том, что нужно измерять и регистрировать параметры, характеризующие состояние исследуемой аппаратуры или объекта и изменение состояния во времени.

Параметры, характеризующие состояние объекта, различны по их физической природе, и эти различные физические величины должны быть преобразованы так, чтобы информация, несомая ими, была доступна для разработки. Вследствие развития микроэлектроники почти все регистрирующие и обрабатывающие элементы — электронные системы. Различные параметры, характеризующие состояние объекта, преобразуются в электрические сигналы, и эти сигналы — цифровые или аналоговые — разрабатываются уже единым способом.

Оборудования, состоящие из подсистем различных физических природ, называются смешанными системами. Для обращения с такими системами были разработаны методы системной техники. Общей чертой этих методов является то, что они составляют наиболее адекватную математическую модель, в которой отражаются те важные свойства системы, которые больше всего оказывают влияние на действие системы. Для описания моделей так называемые уравнения состояния дают самый компактный и наглядный метод.

Пусть будет \mathbf{x} — вектор, составленный из характеристик состояния исследуемой системы, \mathbf{u} — вектор входа, то

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t), \quad (1)$$

будет векториальное уравнение, описывающее изменение состояния системы во времени. Кроме вышеописанного основного или главного уравнения метода состояния, используется еще дополнительное уравнение, которое связывает характеристики состояния с переменными выхода:

$$\mathbf{v} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t), \quad (2)$$

где \mathbf{v} — вектор выхода.

Динамика анализируемой системы может быть описана и без уравнения (2), т. к. это только упрощает практическое применение, связывая вход и выход системы.

В практике приборостроения часто используются линеаризованные модели. В этом случае вышеописанные уравнения значительно упрощаются:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(t)\mathbf{x} + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}, \quad (3)$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{C}(t)\mathbf{x} + \mathbf{D}(t)\mathbf{u}, \quad (4)$$

где матрицы, фигурирующие в уравнениях, содержат и некоторые характерные черты действия системы. Если параметры системы не изменяются значительно во времени (при незначительной усталости, устарении или износе), матрицы состоят только из констант, т. е. $\mathbf{A}(t) \equiv \mathbf{A}$.

Элементы матрицы \mathbf{A} зависят только от структуры системы и от характеристик отдельных элементов системы, поэтому матрица \mathbf{A} называется системной матрицей. Физически однородные элементы смещенных систем расположены в главной диагонали, а остальные элементы играют роль смешанных подматриц связей. Например, если простая система содержит механические и электрические элементы совместно, структура матрицы \mathbf{A} будет:

Подматрица механической подсистемы	Матрица связей электрической и механической подсистем
Матрица связей механической и электрической подсистем	Подматрица электрической подсистемы

Матрицей \mathbf{B} описывается влияние входа на изменение состояния системы. Две матрицы вспомогательного уравнения показывают, как

образуется выход из совместного действия характеристик состояния и характеристик входа непосредственного действия. Матрицы C и D называются матрицей выхода и вспомогательной матрицей.

Система, описанная уравнениями состояния, может быть имитирована на ЭВМ, и, изменяя характеристики исходной системы в некоторых пределах, можем получать информации и таким способом образованных новых системах.

При имитации нужно тщательно проверять пределы действия характеристик исходной системы. Это проверяется лучше всего экспериментами, проведенными физической интерпретацией системы. Результаты имитации системы на ЭВМ должны быть всегда проверены физическим экспериментом. Эти два способа (имитация на ЭВМ и физический эксперимент) образуют совместно эффективный метод создания и проектирования систем с новыми параметрами действия.

Если известна или предписана целевая функция, по которой оборудование (прибор) должно быть оптимальным, эффективно применяется следующий критерий:

$$I = \int_0^T F(x, u, t) dt = \text{minimum}, \quad (5)$$

где F — целевая функция,

T — время перехода состояния.

Описанный метод эффективно применяется, если известна структура системы и математические модели составляющих элементов или подсистем. К составлению системы, удовлетворяющей предписанным требованиям, этот метод не применим. Прежде всего должна быть составлена удобная структура системы и по ходу итеративного исследования система может быть улучшена или по надобности оптимизирована по данным критериям.

Механико-электрические аналогии и общие методы системотехнических моделей дают возможность для исследования сложных смешанных систем. В современных приборах, кроме электрических и механических подсистем, часто применяются и оптические подсистемы. Очень удобным свойством оптических систем является отсутствие инерции, большая скорость распространения сигнала, большая плотность информации (особенно при когерентных оптических системах) и т. п.

С точки зрения приборостроения большое внимание следует уделять ошибкам оптического отображения, т. к. они могут быть источниками искажения информации.

Применение в смешанных системах обосновало стремление в оптике к переводу понятий, примененных в электрических и механических системах, с целью облегчения привязывания к другим подсистемам.

Так возникло понятие «функции оптического переноса». Аналогия понятий заключается в том, что перенос изображений соответствует непосредственно переносу сигналов, шумом являются искажения изображения (ошибки амплитуд и фаз). Понятие частоты во времени в оптике заменяется так называемой частотой в пространстве, которое определяется разбором линий изображений и повторением линий.

В следующем разделе подробнее рассматривается улучшение переносных свойств оптических подсистем. И в этой области оказывают большую помощь конструкторам электронные вычислительные машины, облегчая проведение громоздких расчетов, которые раньше занимали месяцы.

Автоматическая коррекция оптических систем с помощью ЭВМ

При коррекции оптических систем проблема состоит в следующем:

Ряд ошибок отображения h_i ($i=1, 2, \dots, n$) является функцией n параметров x_1, x_2, \dots, x_m . Такие параметры, например: кривизны поверхностей отображающих поверхностей, свободный диаметр этих элементов, коэффициент преломления и рассеивания и т. д. Предельные изменения отдельных параметров узки, а все-таки — т. к. расходы расчета при конструировании нельзя беспредельно увеличивать — все ошибки отображений вместе никогда не будут равны нулю. У остаточных ошибок отображения ищем разумный компромисс. Так, эти величины будут равны h_i^* ($i=1, 2, \dots, n$) при параметрах $x_1^*, x_2^*, \dots, x_m^*$. Конец итеративного коррекционного процесса часто станет известным только по ходу коррекции.

Большинство методов, применяемых для этой цели, старается решить задачу исканием минимума функции \mathbf{H} , характеризующей качество отображения. Функция \mathbf{H} содержит все ошибки отображения во взвешенном виде. Чаще всего наилучшей считается функция

$$\mathbf{H} = \sum_{i=1}^n p_i (h_i - h_i^*)^2. \quad (6)$$

Функция \mathbf{H} не имеет никакой физической смысла, т. к. о пригодности отображения нельзя судить по одной величине. Решение определения минимума является функцией примененных весов. Это имеет тем большее значение, чем больше отличается h_i от h_i^* .

Оказывается разумным создание такой теории ошибок, в которой отдельные и независимые друг от друга виды ошибок отображения могут быть скорректированы независимо друг от друга, и помимо этого определяется минимум суммы квадрата изменений параметров. Из этих

независимых ошибок отображения могут быть скорректированы максимум столько, сколько свободных параметров имеет система. Даже у фотообъективов редко бывает, что монохроматические ошибки были бы скорректированы для пятого или еще высшего рода ошибок. Но возникают здесь еще несколько дополнительных хроматических ошибок, а также ошибки вследствие неточности сборки. Так, в зависимости от требований при данной щели и угла отображения на качество отображения влияют от 10 до 25 ошибок.

Зависимость ошибок от параметра неизвестна в явном виде. Величины этих ошибок для исходной системы рассчитываются так, чтобы трудоемкость расчета не была еще слишком велика. Одновременно определяются и первые частные производные. Так, о поведении системы имеем приближенное описание в виде ряда Тейлора:

$$h_i(x_1 \dots x_m) = h_i(x_1^* \dots x_m^*) + \sum_{j=1}^m \frac{\partial h_i}{\partial x_j} (x_j - x_j^*) + \dots \quad (7)$$

В дальнейшем для простоты обозначений применяется матричный вид уравнений. Ошибки отображений \mathbf{h} образуют n -мерный вектор, а выбранный компромисс-вектор \mathbf{h}^* . Ошибки исходной системы \mathbf{h}_0 и \mathbf{A} являются вариационной матрицей частных производных. Применяя эти обозначения ряд Тейлора, получаем: $\mathbf{h}^* = \mathbf{h}_0 + \mathbf{A}\mathbf{r} + \dots$, где \mathbf{r} — неизвестное изменение параметров, которым определяется желаемый компромисс.

Пусть будет

$$\mathbf{h}^* = \mathbf{h}_0 + \mathbf{A}\mathbf{r} . \quad (8)$$

В системе уравнений количество неизвестных больше, чем количество уравнений, поэтому уравнения никакой информации не дают о линейных зависимостях параметров, а также не разрешается привязывание некоторых неизвестных. При решении нужно исследовать влияние каждого параметра. Если существует решение, что должно быть подобной исходной системе, т. к. изменение остается в этом случае в порядке величины дробной части ряда Тейлора. Это желание выполняется, если потребуем, чтобы сумма квадратов изменения параметров была минимальной. Дополнительное условие вместе с уравнением (8) будет

$$\mathbf{r}^T \cdot \mathbf{r} + \lambda^T (\mathbf{A}\mathbf{r} + \mathbf{h}_0 - \mathbf{h}^*) = \text{minimum}, \quad (9)$$

где λ — мультипликатор Лагранжа, а T обозначает транспозицию матрицы.

Если требование экстремума бывает совместно с дополнительными условиями, можно ввести мультипликатор Лагранжа, известный из вариационного исчисления. Каждый из n линейных уравнений (8)

является дополнительным условием. Вводя мультипликаторы Лагранжа $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$, объединяем их в вектор λ . Приравняв производные по \mathbf{r} нулю, получим: $2\mathbf{r} + \mathbf{A}^T \cdot \lambda = 0$. Из этого выражения и из уравнения (8):

$$\begin{aligned} \mathbf{r} &= -\frac{1}{2} \mathbf{A} \lambda, \\ \mathbf{h}^* - \mathbf{h}_0 &= -\frac{1}{2} \mathbf{A} \mathbf{A}^T \lambda, \\ \mathbf{J} &= -2(\mathbf{A} \mathbf{A}^T)^{-1} (\mathbf{h}^* - \mathbf{h}_0), \end{aligned}$$

откуда получим решение для \mathbf{r} :

$$\mathbf{r} = \mathbf{A}^T (\mathbf{A} \cdot \mathbf{A}^T)^{-1} (\mathbf{h}^* - \mathbf{h}_0). \quad (10)$$

Это решение действительно и в том случае, если в уравнение (9) введены весовые функции.

Ход расчета следующий.

Рассчитывается провизорная оценка $\mathbf{A}^T (\mathbf{A} \mathbf{A}^T)^{-1}$, потом ищется \mathbf{r} для различных $(\mathbf{h}^* - \mathbf{h}_0)$. Матрица решения применяется и для поиска разумного компромисса, т. к. она содержит ряд соотношений. По ней осознаются, например, тяжело корригируемые ошибки отображения. По матрице решения можно судить и об ошибках, которые могут быть корригированы только вместе с другими, а также независимых по теории ошибок, которые в данном случае все-таки более или менее связаны между собой. Информация содержимого матрицей решения может помогать конструктору при выборе дополнительных элементов для уменьшения ошибок отображения. Если наше решение очень далеко от исходной системы, видно, что конструктор имел целью слишком большое улучшение отображения. Уменьшением этого может быть достигнуто некоторое улучшение, но в этом случае лучше всего получать решение из вариационной матрицы.

По алгоритму реализации на ЭВМ изменение параметра \mathbf{r} определяется по формуле (10). Из этого получают новые значения параметров и рассчитываются новые ошибки отображения для них. Матрица решения применяется до тех пор, пока процент нелинейности не превышает заранее строго заданного значения. Это является концом одного цикла улучшения, а таким образом определенная система служит исходной для нового цикла улучшения. Если заранее поставленный компромисс достигнут, с помощью прежнего вектора коррекции можем сформулировать новые высшие требования для улучшения отображений. Это означает, что компромисс непрерывно меняется с целью оптимизации коррекции. По ходу расчета постоянно нужно следить за тем, как параметры меняются между своими пределами действия.

Концом итерации является случай, когда определитель AA^T будет равен нулю. Это произойдет позже, всего при $n > m$.

Если исследуются линейные области изменения исходных параметров, видно, что эти области имеют различную величину. У тех методов, которые исходят из одной характеризующей функции, существует только одна область линейности, которая сложена из нескольких областей линейности с весом. У этих методов различие величин областей не учитывается, поэтому чаще нужно рассчитывать вариационную матрицу, и это увеличивает длительность расчета на ЭВМ. Предложенный метод имеет преимущества и по сравнению с теми методами, которые ищут минимум характеризующих функций, т. к. более соответствуют привычной конструкторской практике и производительность конструкторской работы высока и при применении ЭВМ небольшой мощности.

ЭВМ при оптическом проектировании кузовных деталей

Другой категорией оптических систем являются зеркала. Старинная проблема отражения и теории зеркал получило новое значение в транспортной индустрии.

Проблемы, возникающие в этой области, классифицируются в две группы:

- а) преодоление мешающих рефлексов (напр., на ветровых стеклах или на окнах автомобилей, автобусов и других видов транспорта);
- б) учет отражения света и блеска на эстетическое оформление кузовных изделий.

Применение графопостроителей и методов графики на ЭВМ открыло новые возможности в проектировании. Кафедра точной механики и оптики совместно с автобусным заводом «ИКАРУС» разработала диалоговую систему для геометрического проектирования кузовных деталей с учетом блеска и отражения света. Чертежи, составленные с помощью графопостроителя на различных этапах проектирования, служат не только для визуального контроля, а делают оптическое проектирование неотъемлемой частью конструирования кузовных деталей. В алгоритмах решения проблем отражения и общего геометрического проектирования легко находить одинаковые черты. Общий ход решения показан на рис. 1.

Целью работ у задач типа а) является синтез такого ветрового стекла транспортного средства, на котором меньше всего мешающих отражений возникает от внешних и внутренних источников света. В первую очередь у автобусов очень много сверкающих отражений может появляться перед водителем (например, отражение фар проезжающих

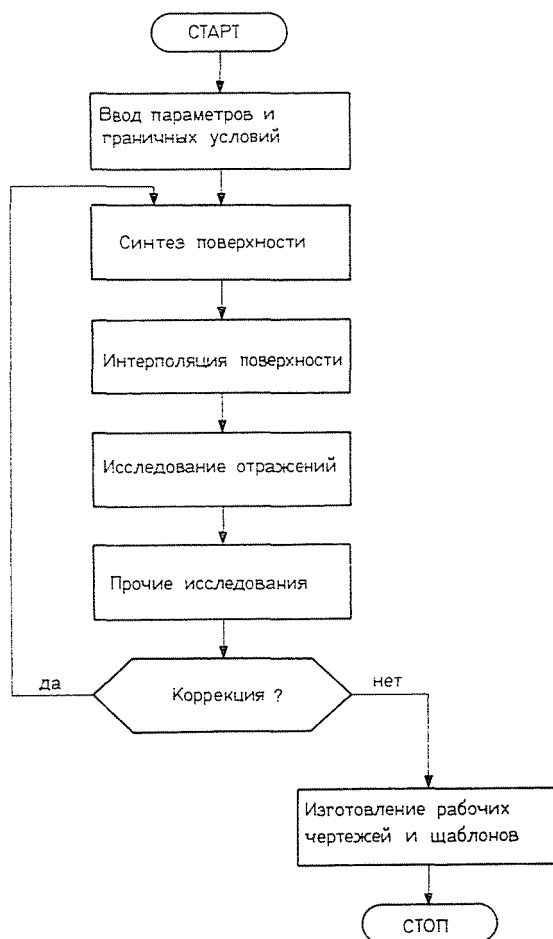


Рис. 1. Функциональная схема системы программ для геометрического и оптического проектирования поверхностей

мимо автомобилей, освещенных витрин магазинов и т. п.), интенсивность которых часто превышает интенсивность информационных светов (например, свет светофора, находящегося на расстоянии 100—150 м).

Мешающие отражения сфилтруются умом водителя, но это вызывает у него дополнительную психическую нагрузку и увеличивает вероятность возникновения аварий. А также может отражаться в «зеркале» ветрового стекла сам водитель, освещенный фарами машин, проезжающих в противоположном направлении. В таком случае водитель сам станет вторичным источником света.

Синтез геометрической формы поверхности проводится на основании вариационного сформулирования задачи отыскания минимума функционала:

$$\Phi = \int_s E ds = \min, \quad (11)$$

где E — интенсивность отражения света, попадающая в глаза водителя;
 s — поверхность ветрового стекла при некоторых ограничениях и граничных условиях.

Ограничением для геометрии ветрового стекла является габарит, определенный конструкцией автобуса, в котором должна располагаться поверхность, а также расстояние поверхности от глаз водителя (950—1050 мм). Технологией изготовления многослойного безопасного стекла налагаются дополнительные ограничения (величина минимального радиуса кривизны, пропорции радиусов кривизны по высоте и ширине стекла). Кроме того, и эстетические требования играют большую роль.

Расположение и интенсивность внешних источников света имеет случайный характер, а траектории лучей и возможность попадания отраженных лучей в глаза водителя зависят и от конструкции кузова (например, от расположения и от величины боковых окон и дверей). Случайные функции приближенно заменяются эталонными источниками света, величины и расположения которых определены из статистических исследований. А остальные факторы можно только тогда иметь в виду, если расчет формы ветрового стекла как часть комплексного конструирования всего кузова после анализа результатов оказывает влияние и на конструкцию кузова.

При синтезе поверхности целесообразно применять стратегию многовариантного проектирования.

Ветровое стекло, имеющее минимальную интенсивность мешающего отражения, синтезированное к данному оформлению кузова, показано на рис. 2 (окружность на виду сверху означает расположение и габаритные размеры водителя).

Следующей фазой проектирования является анализ картин отражения: на виду спереди и со стороны показаны и «световые линии», которые являются картинками отражения света из источника прямолинейной формы. Гармония этих линий с контурными линиями кузовных поверхностей — одно из самых важных эстетических требований. При сопряженных кузовных деталях также очень важен визуальный контроль световых линий.

Имитированная на ЭВМ картина отражений перед водителем показана на рис 3, где стрелки показывают, что с какого направления попадают лучи света, вызывающие отражение на ветровом стекле через

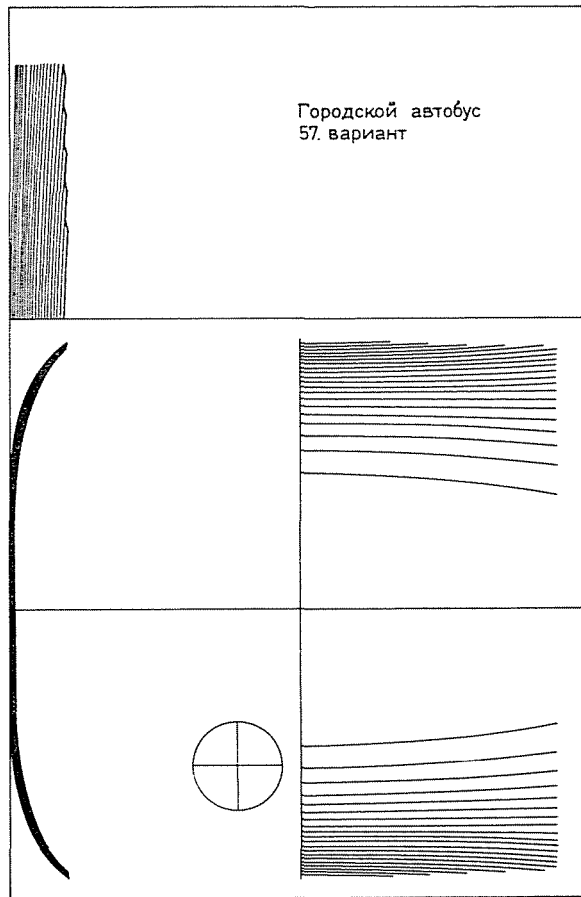


Рис. 2. Синтетизированная поверхность ветрового стекла автобуса

окна в автобус. Буква *s* означает отражение самого водителя. Появление искаженного отражения лица и рук водителя вызывает ряд дополнительных проблем эргономического характера.

Для точного определения расположения источника света, вызывающего мешающее отражение, попадающее в глаза водителя, служит подпрограмма, результат которого показан на рис. 4.

На рисунке в трех проекциях видны те лучи света из внешних источников, которые вызывают точкообразное отражение на ветровом стекле. При разработке внутренней обстановки автобуса нужно ставить какие-нибудь преграды на пути этих лучей. Когда это невозможно, нужно изменить формы ветрового стекла.

Квалификация стекла для городского автобуса
 Маэнтификация параметра: 57
 Глазовой пункт попадает в базу

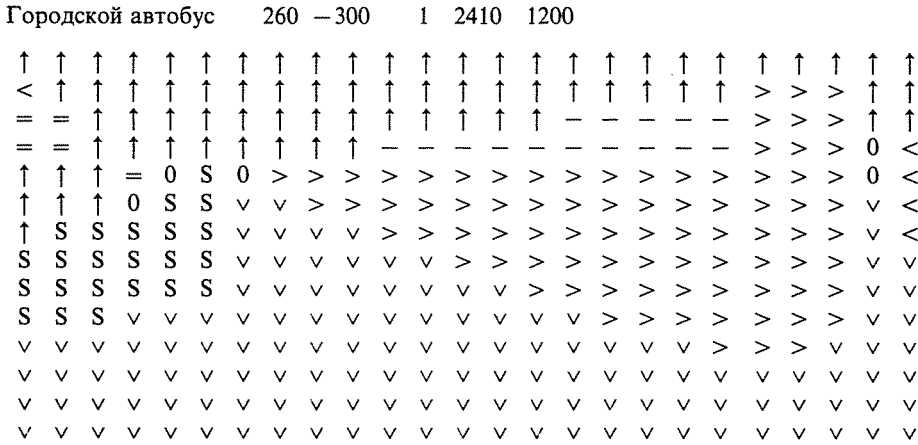


Рис. 3. Результат имитации на ЭВМ отражений на ветровом стекле перед водителем

Городской автобус
 Внутренняя освещенность

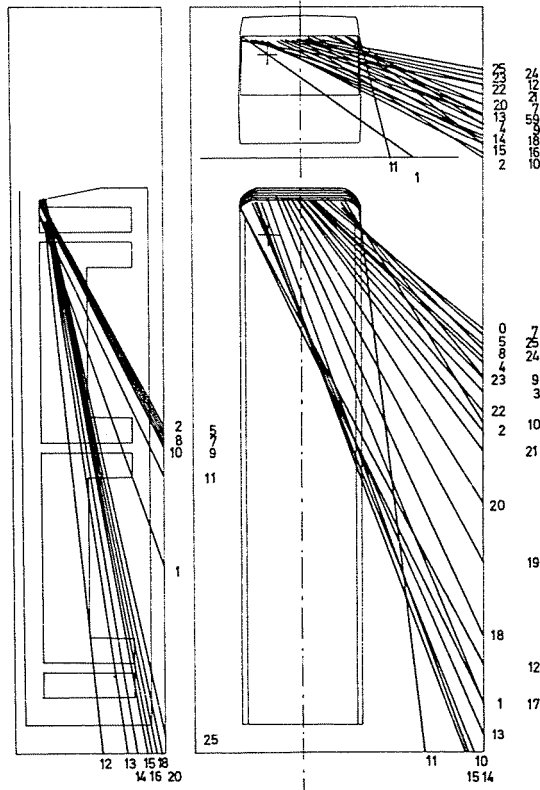


Рис. 4. Направление источников света, вызывающего мешающее отражение

О рассчитанном стекле перед серийным производством изготавливается модель из оргстекла в масштабе 1:1. Для этого, а также для изготовления требуется точная интерполяция поверхности. Эта интерполяция проводится методом траверсных линий КУН-а с помощью бикубических сплайнов. При интерполяции возникает такая проблема, мимо которой часто проходим при применении графического дисплея, — проблема волнистости поверхности. Соответственно требованиям, поставленным к кузовным деталям, не допускаются волны амплитуды даже на десяток доли миллиметра на длине 1000—2500 мм. Для этого требуется применение специальной техники интерполяции.

Изготовленная модель проверяется измерением интенсивностей отражений, и на ней проводится ряд эргономических исследований (рис. 5).

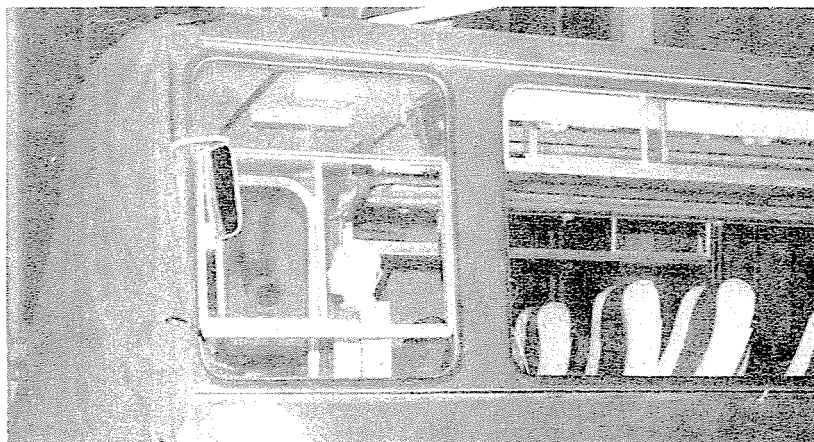


Рис. 5. Измерение и экспериментальная проверка модели поверхности

Проектирование ветрового стекла является частью комплексного проектирования кузова. При проектировании листовых кузовных деталей возникают проблемы подобного характера, в первую очередь вследствие повышенных эстетических требований (задачи типа б). Геометрический элемент кузова не определяется однозначно граничными линиями. Необходимой дополнительной информацией является ход «световых линий».

По алгоритму, показанному на рис. 1, синтезом поверхностей в задачах типа б) является определение траверсных линий, исходя из граничных кривых и из «световых линий». *Метод интерполяции* имеет

при этих проблемах особую важность, а исследование хода «световых линий» на сопряженных деталях соответствует проверке отражений в задачах типа а).

Передняя панель автобуса, спроектированного таким методом, показана на рис. 6, а весь кузов на рис. 7. Сохранение и обработка информации, необходимых для описания совокупности поверхностей такой сложности, требует специального обхода метафайлами в геометрической системе.

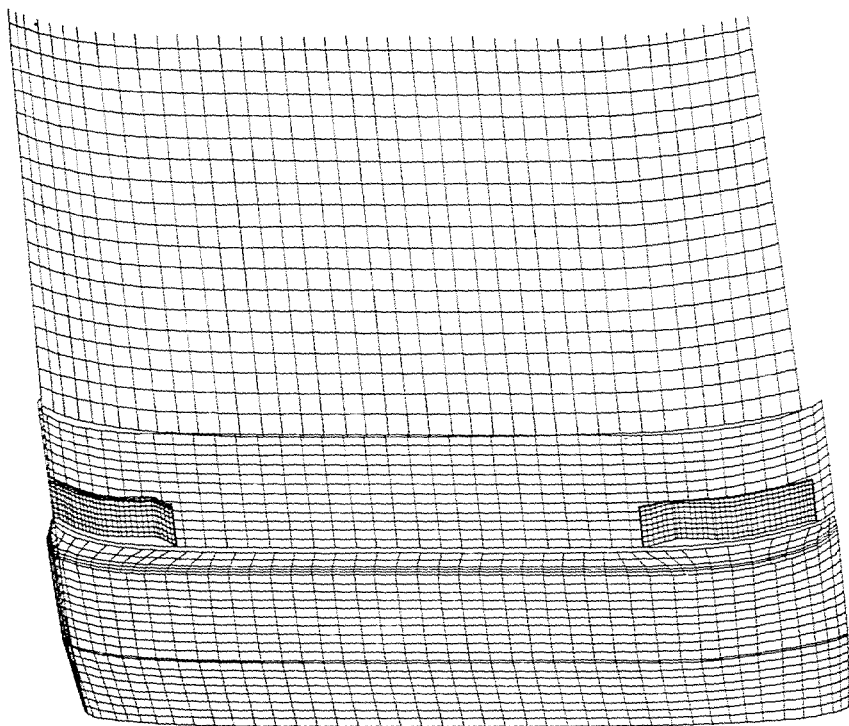


Рис. 6. Передняя панель автобуса

Описанная система программ применяется с 1979 г. при проектировании новых гамм автобусов «ИКАРУС». Сейчас проводится имплементация системы на ЭВМ типа СМ4.

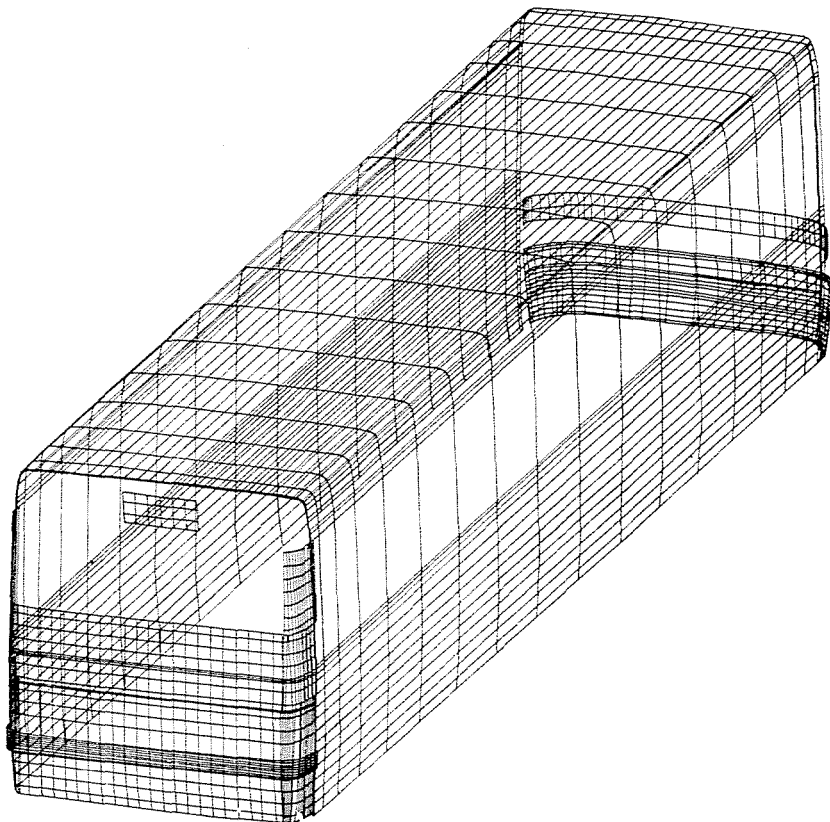


Рис. 7. Кузов автобуса, спроектированный с помощью геометрической системы

Резюме

В статье описаны требования и специфика проектирования смешанных систем, содержащих оптические электронные и механические элементы, а также условия содержания подсистем различных типов.

Показана программа для оптимальной коррекции оптических систем.

Описана система программ для геометрического и оптического проектирования кузовных деталей автобусов.

Prof. Dr. Olivér PETRIK
Dr. Zoltán TURI
Dr. László CSER
Dr. Péter KALLÓ

} H—1521 Budapest