

---

---

# ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

---

---

УДК 681.78.01

И. П. ТОРШИНА, Ю. Г. ЯКУШЕНКОВ

## ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ ЕЕ ЗАДАНЫМИ СВОЙСТВАМИ

Рассматриваются некоторые методы оценки адекватности компьютерной модели оптико-электронной системы ее заданным свойствам. Описывается процедура оптимизации компьютерной модели по критерию адекватности.

*Ключевые слова:* оптико-электронная система, моделирование, компьютерная модель.

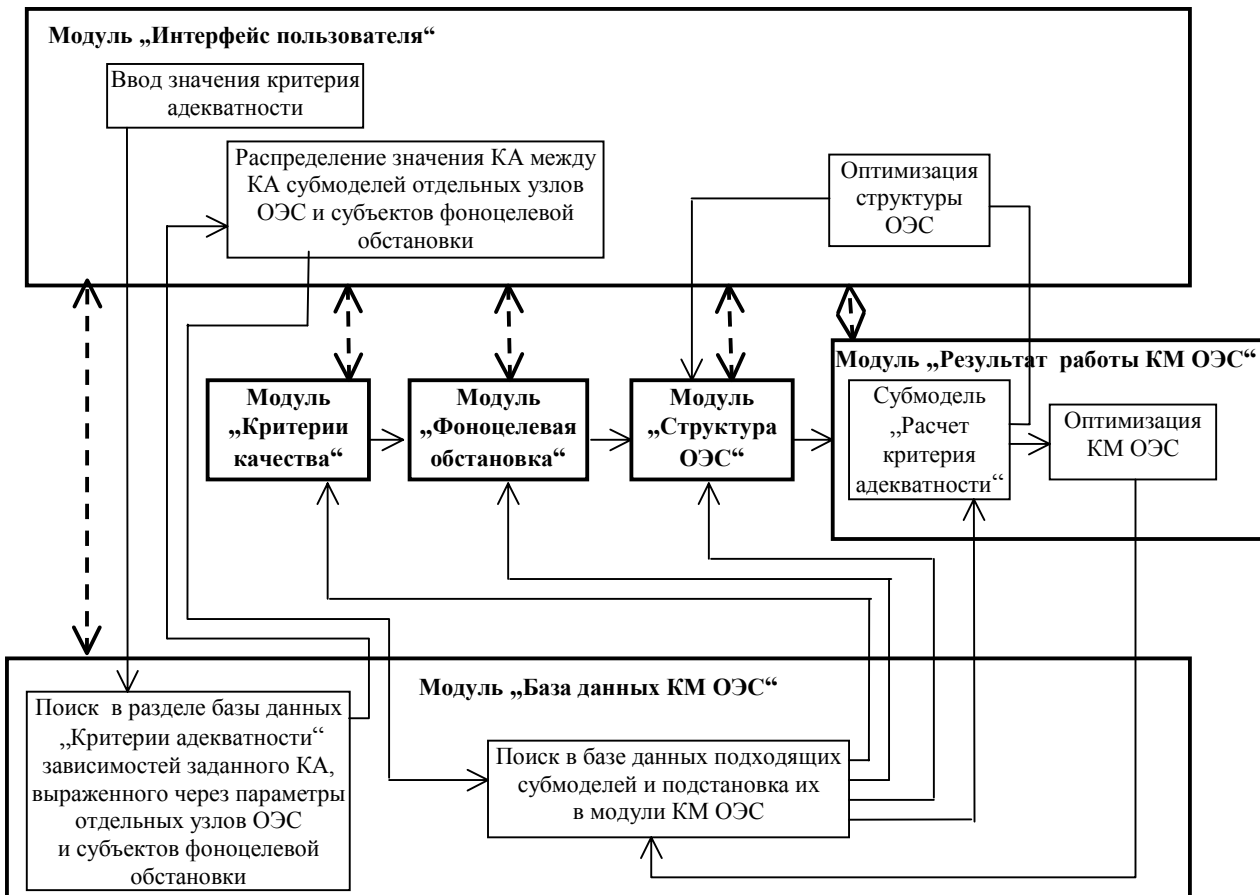
Одним из основных требований, которым должна удовлетворять компьютерная модель (КМ) оптико-электронной системы (ОЭС), является ее адекватность такой характеристике, как достоверность отображения в модели некоторых заданных свойств объекта-оригинала — оптико-электронной системы и условий ее функционирования. Далее, для краткости, будем называть это требование „адекватностью модели“. Адекватность целесообразно оценивать критерием (именуемым далее критерием адекватности — КА), который определяет в количественной мере различие свойств, отображаемых в модели или рассчитываемых с ее помощью, и свойств объекта-оригинала, например показателя эффективности функционирования ОЭС (критерия качества работы ОЭС). Проверку адекватности модели целесообразно проводить на завершающих этапах ее разработки.

В процессе оценки адекватности модели можно получить „характеристику адекватности“ — зависимость изменения КА модели от изменения значений параметров и характеристик ОЭС. Эта характеристика может быть полезна при оптимизации структуры и элементной базы ОЭС, а также при определении „области адекватности“ КМ ОЭС, определяемой граничными значениями входных данных модели. Зная характеристики адекватности, можно также составить модели адаптивных ОЭС.

Неадекватность, т.е. недостоверность или недостаточная достоверность модели в целом, а также составляющих ее отдельных субмоделей, часто объясняется несовершенством методов получения информации об объекте-оригинале (погрешностями в задании исходных данных; неопределенностью параметров и характеристик, влияющих на функционирование ОЭС; неконтролируемым изменением неучтенных в модели факторов; упрощенностью и приближенностью математического аппарата; ограниченными возможностями средств моделирования, ограниченными возможностями пользователя и т.п.) или субъективными причинами (несовершенством вычислительной техники, ошибками оператора, несовершенством и погрешностями систем отображения информации).

Разработка модели ОЭС — процесс поэтапный, и на каждом его этапе целесообразно выполнять анализ возможных причин и источников недостоверности модели, а также осуществлять поиск средств (конструктивных, методических и др.) для снижения или исключения их влияния на адекватность модели [1]. На отдельных этапах моделирования при рассмотрении составных частей КМ ОЭС (ее субмоделей) следует проводить анализ того, какие допущения или несовершенства конкретной субмодели будут влиять на критерий адекватности модели ОЭС в целом и как они могут быть минимизированы.

Структура обобщенной КМ ОЭС рассмотрена в работе [2]. Расчет КА целесообразно осуществлять в отдельном блоке модуля „Результат работы КМ ОЭС“ (см. рисунок). Под оптимизацией КМ ОЭС понимаются процедуры поиска наилучших решений: изменение ее структуры, построение и выбор программной среды и алгоритмов расчета и другие операции, использование которых позволит обеспечить заданные требования к модели. Эти операции также могут быть выделены в отдельный блок в составе модуля „Результат работы КМ ОЭС“.



В модуле „База данных КМ ОЭС“ целесообразно организовать раздел „Критерии адекватности“, содержащий алгоритмы расчета значений КА как функций отдельных параметров структурных частей ОЭС, а также характеристики адекватности.

Доказательство адекватности КМ ОЭС можно проводить натурным или аналитическим методом. Натурный метод доступен, когда реально существует объект-оригинал, т.е. ОЭС, ее прототип или макет. Этот метод заключается в проведении экспериментов, моделируемых с помощью КМ ОЭС, и экспериментов, проводимых на объекте-оригинале (или заменяющем его макете), а также в анализе их результатов. Оценка результатов может быть проведена с использованием статистических методов. Если результат сравнения находится в пределах допустимого диапазона значений КА, то КМ ОЭС можно считать адекватной. В противном случае модель является неадекватной, и требуется ее оптимизация или дальнейшая доработка.

Аналитический метод можно использовать для вновь проектируемой ОЭС при отсутствии реально существующего объекта-оригинала. Этот метод заключается в сравнении результатов экспериментов, промоделированных с помощью рассматриваемой КМ ОЭС, и экспериментов, проведенных с помощью эталонной компьютерной модели исследуемой ОЭС. При отсутствии реально существующего объекта-оригинала проверку адекватности модели целесообразно проводить в два этапа: во-первых, убедиться, что модель выполняет именно поставленную задачу; во-вторых, доказать, что модель решает поставленную задачу с требуемым критерием адекватности. Для этого возможно на испытываемой КМ ОЭС моделировать частный случай, для которого заранее известно решение или результат, и сравнивать полученные результаты с априори известными. Например, в КМ можно ввести входные данные для моделирования уже проверенной на практике ОЭС. Для подтверждения критерия качества модели целесообразно разработать численные эксперименты (тестовые задачи) [3] или воспользоваться сравнением результатов экспериментов, проведенных на КМ ОЭС и на эталонной модели [4]. При этом необходимо составить эталонную модель ОЭС, выбрать критерии сравнения эталонной модели и КМ ОЭС, разработать и провести эксперименты на обеих моделях, найти значения критериев адекватности.

Процедура выбора критерия адекватности относится к числу эвристических процедур, выполняемых с учетом специфики решаемой задачи и имеющихся априорных сведений.

На системотехническом уровне проектирования КА модели целесообразно оценивать по показателям эффективности работы ОЭС (критериям качества). Эти показатели могут быть различными [5]. Так, критериями качества ОЭС, основная задача которых — уверенный прием сигнала на фоне помех и шумов, являются статистические критерии — средний риск, условные вероятности правильного обнаружения, условные вероятности ложных тревог, отношение правдоподобия, отношение сигнал/шум. Измерительные и следящие ОЭС характеризуются точностью, оценками которой служат нормируемые метрологические характеристики; пространственным, энергетическим, временным и спектральным разрешением и рядом других показателей. Для систем обработки и передачи графической информации используют информационную эффективность (или относительную энтропию), а также скорость передачи информации.

В качестве КА часто можно использовать отклонение показателя эффективности работы ОЭС от заданного или требуемого значения. Поскольку такое отклонение зависит от изменения параметров и характеристик системы, для расчета КА можно воспользоваться методом полного дифференциала [6]. Входящие в выражение полного дифференциала отдельные составляющие определяются параметрами отдельных узлов ОЭС и критериями адекватности субмоделей. Анализируя выражение, описывающее КА модели в целом, можно определить требования к КА отдельных субмоделей, рассчитываемых аналогичным методом.

Возможная схема учета критерия адекватности КМ ОЭС приведена на рисунке. Пользователь модели вводит значение критерия адекватности, которое должна обеспечивать КМ ОЭС, выбирает из раздела базы данных „Критерии адекватности“ зависимость этого критерия, выраженного через параметры отдельных узлов ОЭС и субъектов фоноцелевой обстановки. Затем заданное значение критерия адекватности распределяется между КА субмоделей узлов ОЭС и субъектов ФЦО. Если в процессе моделирования по каким-либо причинам были произведены изменения в используемых субмоделях, например при оптимизации структуры проводилась замена узлов ОЭС, то в субмодели „Расчет критерия адекватности“ проводится контроль обеспечения требуемого КА. По известным или рассчитанным значениям КА можно также предъявлять требования к точности задания входных данных в техническом задании на моделирование ОЭС, к адекватности данных, находящихся в БД, а также к форме их представления, например к шагу дискретизации данных.

Рассмотрим следующий пример. Требуется определить  $\Delta_\mu$  — критерий адекватности модели по такому показателю эффективности работы ОЭС, как отношение сигнал/шум  $\mu$  на ее выходе.

В случае преобладания внутренних шумов приемника излучения (ПИ) это отношение можно записать следующим образом [5]:

$$\mu = \frac{k_M k_f \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_\lambda \tau_{\text{опт}}(\lambda) D^*(\lambda) d\lambda}{\sqrt{A \Delta f_{\text{экв}}}}, \quad (1)$$

где  $k_M$  — коэффициент потерь при модуляции и обработке модулированного сигнала;  $k_f$  — коэффициент, учитывающий „небелый“ характер спектра шума;  $\lambda_1, \lambda_2$  — нижняя и верхняя границы спектрального рабочего диапазона;  $\Phi_\lambda$  — спектральная плотность потока излучения на входном зрачке объектива;  $\tau_{\text{опт}}(\lambda)$  — спектральный коэффициент пропускания оптической системы;  $D^*(\lambda)$  — удельная обнаружительная способность ПИ;  $A$  — площадь чувствительного слоя ПИ;  $\Delta f_{\text{экв}}$  — эквивалентная шумовая полоса пропускания электронного тракта.

Полный дифференциал выражения (1) является функцией частных производных при определенном значении аргументов (параметров или характеристик), входящих в это уравнение:

$$\left( \frac{\partial \mu}{\partial k_M} \right)_{k_{M0}}, \left( \frac{\partial \mu}{\partial k_f} \right)_{k_{f0}}, \left( \frac{\partial \mu}{\partial \Phi_\lambda} \right)_{\Phi_{\lambda 0}}, \left( \frac{\partial \mu}{\partial \tau_{\text{опт}}(\lambda)} \right)_{\tau_{\text{опт}}(\lambda)_0}, \left( \frac{\partial \mu}{\partial D^*(\lambda)} \right)_{D^*(\lambda)_0}, \\ \left( \frac{\partial \mu}{\partial A} \right)_{A_0}, \left( \frac{\partial \mu}{\partial \Delta f_{\text{экв}}} \right)_{\Delta f_{\text{экв} 0}}, \left( \frac{\partial \mu}{\partial \lambda} \right)_{\lambda_0}.$$

Так как частная производная от постоянной величины равна нулю, количество частных производных в выражении полного дифференциала может быть уменьшено. Так, в выражении (1) постоянные значения имеют параметры  $k_M, k_f, A, \Delta f_{\text{экв}}$ . Спектральный диапазон  $\lambda_1 \dots \lambda_2$  и величину  $D^*(\lambda)$  на некотором спектральном интервале можно представить в виде массивов постоянных значений. Для узкого спектрального диапазона работы ОЭС коэффициент  $\tau_{\text{опт}}(\lambda)$  также может быть принят постоянным. Тогда

$$\Delta_\mu = \left( \frac{\partial \mu}{\partial \Phi_\lambda} \right)_{\Phi_{\lambda 0}} \Delta_{\Phi_\lambda}. \quad (2)$$

Поток  $\Phi_\lambda$ , приходящий на входной зрачок, и критерий адекватности  $\Delta_{\Phi_\lambda}$ , который обеспечивается при расчете  $\Phi_\lambda$ , рассчитываются в модуле „Фоноцелевая обстановка“ КМ ОЭС [2], где при этом учитываются составляющие излучения, их спектральный состав, взаимное расположение и др. [2,7—9].

Область адекватности КМ ОЭС, характеризуемая диапазонами изменений исходных данных, где модель соответствует требованиям адекватности, целесообразно определять в процессе моделирования ОЭС. Для этого в блоке модуля „Результат работы КМ ОЭС“ может быть сформирована таблица „Определение области адекватности“, графы которой повторяют графы, содержащие условия выбора информации из база данных КМ ОЭС. Далее в таблице формируется сводная информация по используемым в КМ ОЭС данным. При этом для одноименных условий использования различных данных выбираются общие диапазоны их изме-

нения. Сводная информация ставится в соответствие сформированному на начальных этапах моделирования перечню исходных данных.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проектирование оптико-электронных приборов / Ю. Б. Парвулюсов, С. А. Родионов, В. П. Солдатов и др.; Под ред. Ю. Г. Якушенкова. М.: Логос, 2000. 488 с.
2. Торшина И. П. Методика разработки обобщенной компьютерной модели оптико-электронной системы // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 3. С. 61—65.
3. Guissin R., Lavi E., Palatnik A., Gronau Y. IRISIM: Infrared imaging simulator // SPIE Proc. 2005. Vol. 5784. P. 190—203
4. Stephen W. TOD test method for charactering electrooptical system performance // SPIE Proc. 2001. Vol. 4372. P. 39—45.
5. Якушенков Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. М.: Логос, 2004. 472 с.
6. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1986. 544 с.
7. Максимова Н. Ф., Сагитов К. И., Якушенков Ю. Г. Компьютерная модель тепловизионной системы // Оптико-электронные системы визуализации и обработки оптических изображений: Сб. М.: ЦНИИ „Циклон“, 2001. Вып. 1. С. 133—138.
8. Торшина И. П. Формирование сценария работы оптико-электронной системы для ее обобщенной компьютерной модели // Там же. М.: ЦНИИ „Циклон“, 2007. Вып. 2. С. 142—151.
9. Торшина И. П. Формирование баз данных для компьютерной модели оптико-электронной системы // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2002. № 3. С. 149—155.

**Сведения об авторах****Ирина Павловна Торшина**

— канд. техн. наук, доцент; Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК), кафедра оптико-электронных приборов; E-mail: torshinai@yandex.ru

**Юрий Григорьевич Якушенков**

— д-р техн. наук, профессор; Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК), кафедра оптико-электронных приборов, зав. кафедрой; E-mail: yakush@miigaik.ru

Рекомендована кафедрой  
оптико-электронных приборов

Поступила в редакцию  
10.06.09 г.