

На правах рукописи

Торшина Ирина Павловна

**Методология компьютерного моделирования
оптико-электронных систем**

Специальность 05.11.07 – «Оптические и оптико-электронные приборы и
комплексы»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва –2009

Работа выполнена в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГА и К)

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Бездидько Сергей Николаевич

доктор технических наук, профессор
Демин Анатолий Владимирович

доктор технических наук, профессор
Мосягин Геннадий Михайлович

Ведущая организация: ФГУП НПК «Государственный оптический институт им. С.И.Вавилова»

Защита состоится «_____» _____ в _____ час. _____ мин. на заседании диссертационного совета Д 212.143.03 в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГА и К) по адресу: г. Москва К-64, Гороховский пер., д. 4, зал заседаний Ученого совета

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГА и К)

Автореферат разослан «_____» _____ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Климков Ю.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Оптико-электронное приборостроение в настоящее время во многом определяет прогресс в освоении ряда приоритетных направлений развития науки и техники. Расширяются области применения оптико-электронных систем (ОЭС); непрерывно создаются новые ОЭС, решающие разнообразные сложные задачи, например, в интересах обороны и обеспечения безопасности. На заседании Военно-промышленной комиссии при Правительстве РФ 24.09.2008г. зам. Председателя Правительства РФ С.Б.Ивановым отмечалось, что разработка нового поколения ОЭС и комплексов является чрезвычайно актуальной для реализации Государственной программы вооружения на 2007-2015 г.г. и на долгосрочную перспективу (газета «Военно-промышленный курьер», №39(225), 1-7.10.08, с.6). В США реализуется правительственная Программа по разработке критических оборонных технологий МСТР, в своей значительной части направленная на создание новых оптико-электронных средств. Третье поколение ОЭС, основой которых являются матричные многоэлементные приемники излучения, работающие в режиме электронной выборки сигналов и чувствительные в двух или нескольких спектральных диапазонах, усиленно разрабатывается в последние годы многими фирмами США, Франции, Англии и Японии и ряда других стран.

При разработке и проектировании новых ОЭС широко используются методы компьютерного моделирования, которое позволяет ответить на ряд важных вопросов, например, какие алгоритмы обработки сигналов и какая элементная база, используемые в ОЭС, являются наиболее рациональными с точки зрения различных требований, предъявляемых к системе, и, в частности, для обеспечения заданных показателей эффективности её работы. Компьютерное моделирование позволяет отказаться от дорогостоящих натурных исследований и испытаний на первых этапах проектирования вновь разрабатываемых ОЭС.

Общей теории моделирования посвящены работы С.В. Емельянова, М.Пешеля, И.П.Норенкова, Н.Н.Моисеева, Н.П.Бусленко, А.А.Самарского, В.Я.Цветкова, Дж. Моудера, Р.Шеннона и др. Однако существенная специфика моделирования современных ОЭС в этих работах никак не отображена. В нашей стране и за рубежом рядом исследователей (М.А.Ган, А.В.Демин, В.В.Малинин, В.П.Иванов, В.И.Курт, В.А.Овсянников, В.Л.Филиппов, Р. Vijl, E.J.Borg, R.G.Driggers, G.C.Holst и др.) проведена большая работа по созданию компьютерных моделей ОЭС конкретного назначения или их отдельных узлов. Нужно отметить, что подавляющее большинство известных компьютерных моделей ОЭС (КМ ОЭС) описывает ОЭС с оптико-механическим сканированием и одним приемником (линейкой приемников) или ОЭС с матричным приемником излучения (МПИ), работающие только в каком-либо одном спектральном диапазоне.

В силу ряда факторов, например закрытого характера сведений о многих ОЭС или распространения на них «ноу-хау», публикуемые в открытой печати сведения о компьютерных моделях ОЭС часто носят достаточно общий характер, не позволяя разработчику новой ОЭС воспользоваться ими. Вместе с тем в известных публикациях отсутствует изложение общей методологии компьютерного моделирования, столь необходимой при проектировании новых систем, а также ряда важных составляющих этой методологии. Так, например, методы оценки адекватности КМ ОЭС в известных публикациях практически отсутствуют.

По этим причинам и с учетом непрерывно растущего числа разработок новых ОЭС, особенно ОЭС 3-го поколения, создание обобщенной методологии построения компьютерных моделей ОЭС представляется весьма актуальным.

Целью настоящей диссертации являлось решение научной проблемы, имеющей важное народнохозяйственное и оборонное значение, а именно, разработка общей методологии (принципов и методов) компьютерного моделирования ОЭС.

Для реализации этой цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Определить последовательность основных этапов компьютерного моделирования ОЭС;
2. Разработать структуру обобщенной КМ ОЭС, являющуюся основой для моделирования ОЭС различного назначения;
3. Разработать методики составления отдельных модулей КМ ОЭС, включая базу данных модели;
4. Предложить методы оценки адекватности компьютерной модели, в том числе в случае отсутствия реально существующего объекта-оригинала, с которым можно было бы сравнивать модель;
5. Рассмотреть специфику компьютерных моделей ОЭС 3-го поколения;
6. Проверить предложенную методологию на примерах разработки новых КМ ОЭС.

Предметом исследования являются оптико-электронные системы и их компьютерные модели.

Методы исследования базируются на положениях общей теории моделирования сложных технических систем.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Определена рациональная последовательность основных этапов компьютерного моделирования ОЭС;
2. Предложена структурная схема обобщенной КМ ОЭС;
3. Разработаны методики определения рационального состава и построения основных модулей обобщенной КМ ОЭС;
4. Предложено ранжирование отдельных составляющих сигнала, поступающего на вход ОЭС;
5. Предложен метод количественной оценки адекватности КМ ОЭС;

6. Выработаны рекомендации по составлению структурных схем КМ ОЭС 3-го поколения и их отдельных модулей;
7. Предложена методика модификации обобщенной структурной схемы КМ ОЭС применительно к ОЭС, работающим активным методом.

Достоверность предложенной методологии была подтверждена в результате сопоставления результатов компьютерного моделирования, в котором была реализована предложенная методология, с результатами натуральных экспериментов и испытаний тепловизионных систем и систем вскрытия камуфляжа.

Практическая ценность результатов:

1. Предложенная общая методология компьютерного моделирования ОЭС позволяет с единых позиций вести моделирование вновь создаваемых ОЭС, разрабатывать компьютерные модели отдельных её модулей и компьютерные модели показателей эффективности, используя разработанную структуру обобщенной КМ ОЭС, и методологию формирования её отдельных модулей;

2. Методы аналитической оценки адекватности компьютерных моделей ОЭС позволяют оценить области применения этих моделей, а в ряде случаев отказаться от дорогостоящего физического (натурного) эксперимента при проектировании и исследованиях сложных ОЭС;

3. Использование разработанной методологии позволит с требуемой адекватностью моделировать разнообразные структуры ОЭС 3-го поколения, определять показатели качества их работы в различных ситуациях, оценивать эффективность использования применяемой элементной базы, что позволит значительно сократить средства на разработку этих систем;

4. Использование изложенных в настоящей диссертации методов и методик позволило провести компьютерное моделирование ряда ОЭС конкретного назначения, дать рекомендации по совершенствованию этих систем и оценку возможной области их эффективного применения. Работы были выполнены в рамках хоздоговоров с ЦНИИ Точмаш - «Разработка компьютерной модели для оценки эффективности средств маскировки в оптическом диапазоне спектра» (тема № 1-Э/ПР), с ЦНИИ «Циклон» - «Компьютерная модель тепловизионной системы» (тема №1011-хд), контракта (трудового соглашения) с НПО «Комета». Проведенные исследования легли в основу работы по гранту № 2.1.2/4163 Минобрнауки РФ «Методология компьютерного моделирования оптико-электронных систем третьего поколения» в рамках аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010 годы)», подраздел 2.1.2 «Проведение фундаментальных исследований в области технических наук», номер государственной регистрации 01200904617.

5. Основные положения предложенной методологии включены в учебную программу дисциплины «Компьютерное моделирование оптико-

электронных систем», используемую при подготовке магистров по направлению «Оптотехника» в МИИГАиК.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Предложенная структура обобщенной КМ ОЭС может служить основой для начального этапа моделирования вновь разрабатываемых ОЭС.

2. Основными этапами компьютерного моделирования ОЭС являются:

– представление показателей эффективности работы системы, содержащихся в техническом задании на разработку, в общем параметрическом виде путем обращения к субмоделям модулей «Фоноцелевая обстановка», «Структура ОЭС», «База данных КМ ОЭС»;

– расчет показателей эффективности в модуле «Результат работы КМ ОЭС»;

– сопоставление результатов расчета показателей эффективности с заданными значениями;

– проведение параметрической или структурной оптимизации ОЭС в случае, если полученные результаты не удовлетворяют пользователя. Для этого используются алгоритмы оптимизации и обратная связь с модулями «Структура ОЭС» и «Исходные данные», содержащиеся в обобщенной КМ ОЭС;

– проведение контрольного расчета критерия адекватности в соответствующем блоке модуля «Результат работы КМ ОЭС» при получении удовлетворительных результатов расчета показателей эффективности.

3. С целью упрощения модели без потери её адекватности необходимо произвести ранжирование составляющих входного сигнала, создаваемых субъектами фоноцелевой обстановки (ФЦО) на входе ОЭС.

4. Адекватность КМ ОЭС может быть оценена с помощью критерия адекватности, определяемого аналитически, с помощью выражений, описывающих выбранный или заданный показатель эффективности работы ОЭС, или на основе экспериментальной проверки адекватности по предложенной в диссертации методике;

5. Специфические особенности компьютерного моделирования двух- и многодиапазонных ОЭС 3-го поколения (МОЭС), а также ОЭС, работающих активным методом, в большинстве случаев могут быть учтены путем ввода в базу данных обобщенной структурной схемы КМ ОЭС специальных подразделов, содержащих специфические субмодели, алгоритмы обработки сигналов, параметры и характеристики отдельных узлов и т.п.

Результаты работы докладывались и обсуждались на 5-ой, 6-ой, 7-ой и 8-ой Международных конференциях «Прикладная оптика» (Санкт-Петербург, 2002, 2004, 2006, 2008 г.г.), на 5-ой, 6-ой и 7-ой Международных конференциях «Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации - Распознавание» (Курск, 2001, 2003, 2005 г.), Международных форумах «Оптика-2007» и «Optics-2009» (Москва, ВВЦ), на научно-техническом семинаре кафедры

оптико-электронных приборов и систем Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики (2008 г.), на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава МИИГАиК (Москва, 2008, 2009 г.г.).

Основные результаты работы изложены в монографии «Компьютерное моделирование оптико-электронных систем первичной обработки информации» (М.: Университетская книга; Логос, 2009. - 248 с.) и 26 научных публикациях, в том числе в 9 статьях, опубликованных в журналах, вошедших в перечень ВАК РФ. По теме диссертации получено авторское свидетельство №2003620073 от 10.04.2003 г.

Диссертация объемом 202 стр. состоит из 5 глав, содержит 43 рис., библиографию (249 наим.) и одно приложение.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна и практическая значимость полученных результатов и их достоверность, а также основные положения, выносимые на защиту.

В главе 1 дается краткий обзор ряда известных современных отечественных и зарубежных компьютерных моделей оптико-электронных систем. Отмечаются особенности этих моделей, описывающих, в основном, ОЭС конкретного назначения, которые работают только в каком-либо одном спектральном диапазоне. Делается вывод о том, что приводимые в описаниях известных моделей данные не позволяют, в большинстве случаев, использовать их для моделирования при проектировании или анализе новых систем и для оценки адекватности моделей в случае изменений условий работы системы. По этой причине отмечается целесообразность разработки общей методологии компьютерного моделирования ОЭС, отображающей обобщенную структуру компьютерных моделей ОЭС, их логическую организацию, принципы составления и алгоритмы работы отдельных блоков модели (модулей и субмоделей), методы оценки адекватности моделей. Указывается, что такая методология позволит существенно упростить процесс создания компьютерных моделей вновь разрабатываемых и часто весьма сложных ОЭС.

В главе 2 рассматриваются основные этапы компьютерного моделирования оптико-электронных систем. К особенностям моделирования таких сложных систем, какими являются ОЭС, относятся:

– большое разнообразие условий работы и, в частности, фонов и помех, которые необходимо учитывать для оценки эффективности применения многих ОЭС, а также часто встречающаяся невозможность достаточно адекватного априорного описания этих условий;

- сложность обобщенного описания ОЭС, решающих различные задачи, т.е. существенные различия структурных схем, конструкции, условий эксплуатации и других признаков систем конкретного назначения;
- изменение размерности математического описания сигналов в отдельных звеньях ОЭС, например, переход от многомерного оптического сигнала в оптической системе ОЭС к одномерному электрическому сигналу в электронном тракте;
- сложность достижения адекватности модели ОЭС для многих практических случаев.

Разработка компьютерной модели ОЭС, как правило, заключается в последовательном выполнении четырех основных этапов, приведенных на рис. 1, в результате которых производится переход от ОЭС к её компьютерной модели.

В общем случае в исходных данных, формируемых на первом этапе моделирования ОЭС, учитываются или устанавливаются: основные требования к моделируемому объекту-оригиналу, т.е. к ОЭС; назначение модели; общие предположения о путях решения поставленной задачи и адекватности модели; степень универсальности модели; информация о форме представления результатов моделирования и о возможных вариантах проведения испытаний модели.

На втором этапе разработки КМ степень подробности описания ОЭС и выбор для этого подходящего математического аппарата определяются принятыми для этого описания методами и зависят, в основном, от требований к адекватности разрабатываемой модели. Здесь же производится выделение существенных и несущественных свойств, отображаемых в модели; разбиение параметров и переменных на входные и выходные; формируются описания процессов преобразования сигнала в системе.

Аналитическая модель ОЭС, основанная на функциональном описании ОЭС, выражает зависимости, существующие между целевой функцией (или показателями эффективности её реализации), входными сигналами ОЭС, внутренними параметрами структуры ОЭС, фазовыми переменными структуры ОЭС, внешними и выходными параметрами на области функционирования. Под областью функционирования понимается многомерное пространство переменных, в котором работает система, и к которым относятся, например, система координат, длина волны, время, состояние поляризации и др.

Аналитически модель ОЭС можно описать следующей системой:

$$\left. \begin{aligned} d(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i) &= F_1(u(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i), v(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i), a(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i)) \\ c(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i) &= F_2(u(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i), v(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i), d(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i), a(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i)) \\ w(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i) &= \\ &= F_3(u(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i), v(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i), d(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i), c(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i), a(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i)) \end{aligned} \right\} (1)$$

где $d(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i)$, $u(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i)$, $c(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i)$, $v(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i)$, $a(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i)$, $w(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i)$ – элементы массивов фазовых переменных, характеризующих изменяющиеся в области функционирования свойства структурных частей ОЭС (d); входных сигналов ОЭС (u); выходных параметров (c); внешних параметров, характеризующих свойства внешней по отношению к исследуемому объекту среды (v); внутренних параметров, описывающих свойства структурных частей ОЭС (a); показателей эффективности на области функционирования ОЭС (w), определяемой параметрами: x,y,z - системой координат, λ - длиной волны, t - временем, φ - состоянием поляризации, соответственно; $F_1(\cdot)$, $F_2(\cdot)$, $F_3(\cdot)$ – операторы (аналитические, алгоритмические выражения), описывающие изменения зависимых и независимых переменных и показателей эффективности по области функционирования.

Любые из этих параметров и переменных могут быть управляемыми, которые могут изменяться какими-либо операторами в процессе моделирования, и неуправляемыми, которые не могут быть изменены оператором, но оказывают влияние на процесс моделирования.



Рис. 1. Этапы разработки компьютерной модели ОЭС

Математическая модель ОЭС и алгоритм её реализации позволяют представить структуру модели в виде совокупности отдельных частей (модулей, субмоделей, блоков, разделов и т.п.) и взаимосвязей между ними, необходимых для обеспечения решения задач моделирования, включая описание ОЭС и исследование его свойств.

Компьютерная модель ОЭС, как правило, должна учитывать весьма разнообразные условия, в которых она работает - среду, особенности излучателей (объектов, фонов, помех), метод работы ОЭС и т.д. Поэтому целесообразно иметь обобщенную компьютерную модель оптико-электронной системы (КМ ОЭС), в которой учитываются самые различные условия функционирования системы, а также возможные изменения её структуры и элементной базы.

Структура обобщенной КМ ОЭС может быть представлена в виде совокупности нескольких модулей и отображать не только структуру собственно ОЭС, но и процесс формирования исходных данных на моделирование ОЭС, фоноцелевую обстановку (ФЦО), называемую также сценарием работы ОЭС, т.е. условия функционирования системы, а также результаты работы КМ ОЭС и общую базу данных (БД), которые представлены на рис. 2.

В модуле «Исходные данные» формируются и вводятся требования к моделируемой ОЭС, среди которых, как правило, содержатся показатели эффективности её работы, а также входные параметры и характеристики, необходимые для осуществления моделирования.

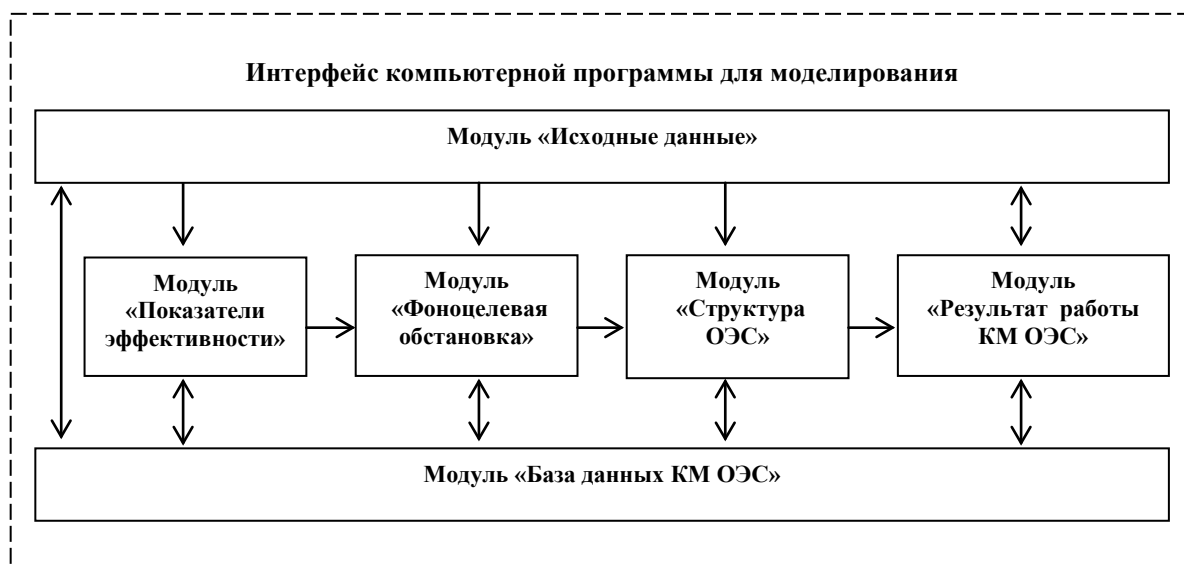


Рис. 2. Структура обобщенной КМ ОЭС

Разработка модуля «Исходные данные» является итерационным процессом и его окончательное формирование производится после составления всей КМ ОЭС, определения результатов вычисления показателей

эффективности работы ОЭС, оценки адекватности модели, и сводится к решению следующих основных задач:

1. Определение перечня исходных данных и формы их представления;
2. Анализ влияния задаваемых исходных данных на результат работы КМ ОЭС и значения показателей эффективности работы ОЭС;
3. Использование результатов проведенного анализа (п. 2) для корректировки перечня и формы представления исходных данных в соответствии с обратными связями, приведенными на рис. 2.

Результаты решения задач синтеза и анализа системы, процесса структурной и параметрической оптимизации (как всей системы, так и локальной оптимизации отдельных её структурных частей) оценивается с помощью определяемых в результате моделирования показателей эффективности работы системы или отдельных её структурных частей (СЧ), которые должны сравниваться с заданными или выбранными априорно критериями, обычно с их числовыми значениями, содержащимися в исходных данных на проектирование ОЭС и её моделирование. Поэтому в структуру КМ ОЭС введен отдельный модуль «Показатели эффективности», в котором производится формирование массива показателей эффективности, то есть выбор (или задание) и расчет требуемых показателей (критериев качества) ОЭС и её структурных частей.

Показатели эффективности в общем случае представляются в виде:

$$W=w[u(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i), v(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i), a(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i), c(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i), d(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i)], \quad (2)$$

где $d(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i)$, $u(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i)$, $c(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i)$, $v(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i)$, $a(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i)$, $w(x,y,z,\lambda,t,\varphi_i)$ элементы массивов, содержащиеся в (1).

Схема алгоритма работы с модулем «Показатели эффективности» приводится на рис. 3.

В модуле «Фоноцелевая обстановка» описываются источники излучения - субъекты ФЦО, сигналы от которых попадают на входной зрачок ОЭС, а также среда распространения излучения. Излучателями могут быть объекты наблюдения (цели), фоны и помехи, которыми, например, могут являться распространенные естественные излучатели - подстилающая поверхность (ландшафт), небо, облачность, Солнце, среда работы ОЭС и другие источники. Модуль также должен содержать зависимости, описывающие параметры и характеристики нестационарных субъектов ФЦО, например, подвижные фоны и объекты, их перемещения и взаимодействие, изменения теплофизических свойств излучателей во времени, а также изменяющиеся освещенности наблюдаемой ФЦО и т.п.

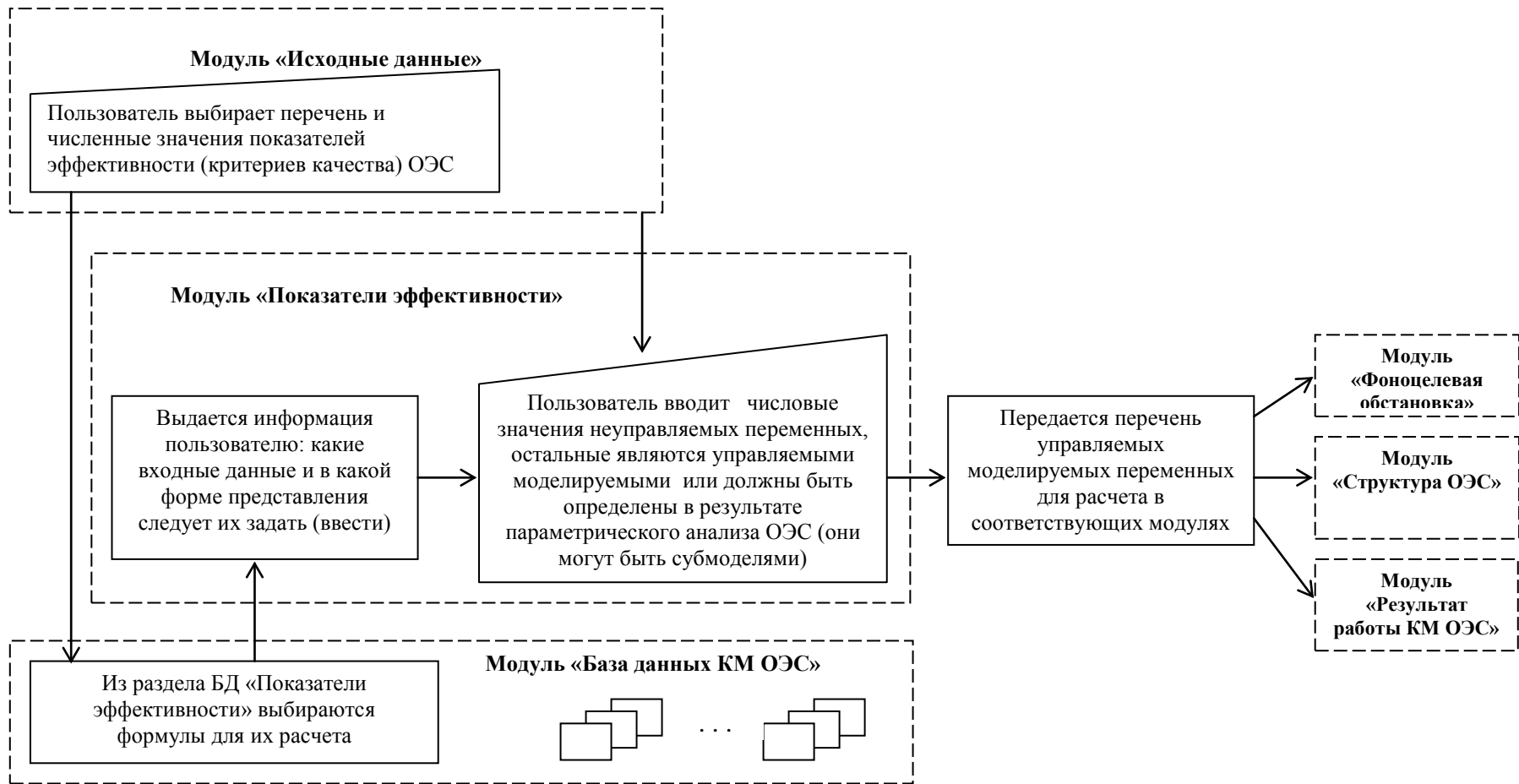


Рис. 3. Схема алгоритма работы с модулем «Показатели эффективности»

Разработка модуля (субмодели) «Фоноцелевая обстановка» в КМ ОЭС базируется на следующих положениях:

1. Субъекты ФЦО разделяются на следующие группы: «Цели», «Фоны», «Среда», «Помехи».

2. В обобщенной модели ОЭС все излучатели делятся на следующие типы: точечные, протяженные (перекрывающие все угловое поле ОЭС) и площадные (занимающие часть углового поля ОЭС).

3. Реальные излучатели имеют, как правило, сложную излучающую и отражающую поверхность. Описать и разместить в БД КМ ОЭС все возможные описания таких поверхностей - задача трудно выполнимая. По этой причине для каждого субъекта ФЦО целесообразно вначале рассмотреть возможности упрощения этого описания.

4. Для расчета величин составляющих сигнала от субъекта ФЦО часто полезно знать его теплофизические свойства и характеристики отражения. Эти свойства и характеристики могут быть заданы или выбраны из БД КМ ОЭС в соответствии с классификацией субъектов ФЦО, заложенной (предусмотренной) в БД.

5. Сигналы, приходящие на вход ОЭС от субъектов ФЦО, могут создаваться за счет их собственного (прямого) и отраженного или рассеянного излучения. Для каждого субъекта ФЦО необходимо установить, источником каких составляющих сигнала он является.

6. Для упрощения процесса моделирования ФЦО целесообразно провести ранжирование отдельных составляющих сигнала, образующегося на входе ОЭС. Поскольку вклад излучения различных субъектов ФЦО в общий сигнал на входе ОЭС не равнозначен, то целесообразно определить те из них, которые вносят наибольший вклад в этот сигнал, и напротив, определить, какими составляющими можно пренебречь при моделировании ОЭС.

Алгоритм ранжирования составляющих сигнала на входе ОЭС заключается в следующем: сначала рассчитывается допуск на ранжирование, т.е. величина изменения входного сигнала, при которой обеспечивается допустимое изменение заданного показателя эффективности работы ОЭС; затем определяются составляющие сигнала, сумма значений которых обеспечивает этот допуск (рис. 4).

Ранжирование позволяет не только упростить расчет входных сигналов и решение задач моделирования ОЭС, но и сократить перечень входных данных, используемых в КМ ОЭС, а также исключить из дальнейшего моделирования субъекты ФЦО, вклад которых в общий сигнал мал. Основным показателем целесообразности проведения ранжирования является выполнение заданных показателей эффективности (критериев качества) работы ОЭС.

7. Среда, которой очень часто является атмосфера, может рассматриваться в трех качествах: как источник собственного и рассеянного излучения; как фактор, ослабляющий излучение, приходящее от всех субъектов

ФЦО на вход ОЭС, а также в качестве среды, влияющей на теплообмен между отдельными субъектами ФЦО.

8. Модели фонов в соответствии с их физической природой и пространственной макро- и микроструктурой целесообразно разделить на отдельные подгруппы («Ландшафт», «Водная поверхность», «Небосвод» и т.д.), что позволяет значительно упростить их описание и последующую организацию и работу с БД КМ ОЭС.

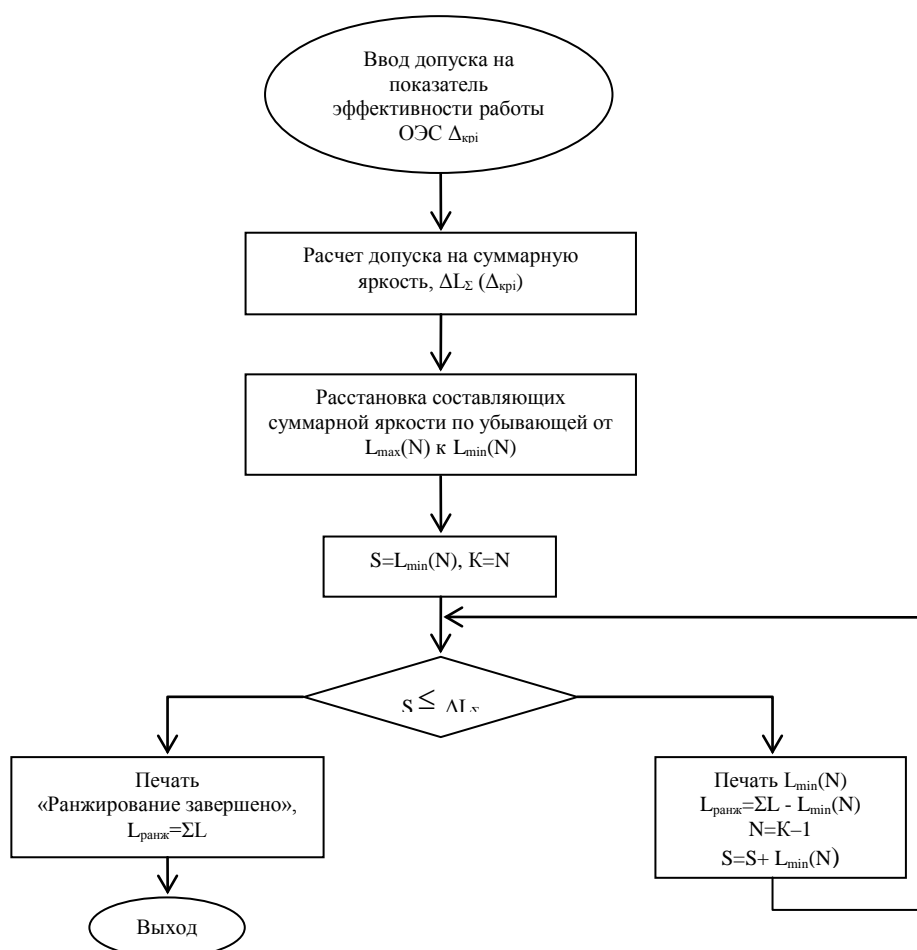


Рис. 4. Алгоритм «Ранжирование составляющих яркости на входе ОЭС»: $L_{\min}(N)$ – минимальное значение яркости; ΔL_{Σ} – допуск на суммарную яркость; ΣL – суммарная яркость излучения от всех субъектов ФЦО на входном зрачке ОЭС; $L_{\text{ранж}}$ – яркость после ранжирования, не учитывающая малые составляющие; N – порядковый номер составляющей яркости в ряду, упорядоченному по убывающей; S, K – промежуточные переменные

Схема алгоритма работы с модулем «Фоноцелевая обстановка» и его связи с другими модулями КМ ОЭС приведена на рис. 5.

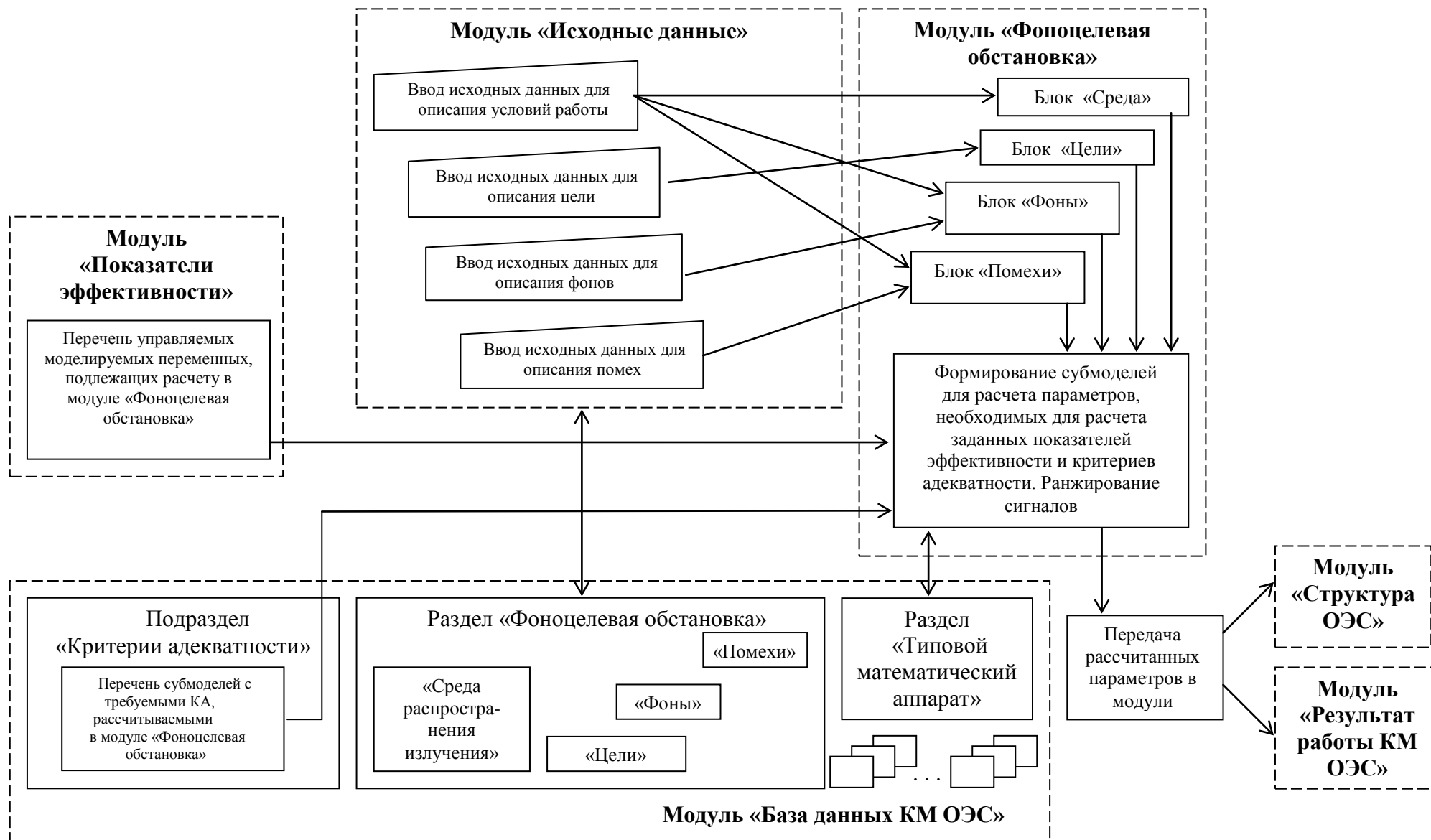


Рис. 5. Схема алгоритма работы с модулем «Фоноцелевая обстановка»

Модуль «Структура ОЭС» отображает структуру системы как совокупность отдельных узлов и элементов – структурных частей (СЧ), представляемых через их параметры и характеристики, а также описывает процесс преобразования сигналов, идущих от входного зрачка системы до выходного блока ОЭС.

При структурировании и разбиении структуры на иерархические уровни (ИУ) целесообразно руководствоваться возможной мотивацией обращения проектировщика ОЭС к КМ ОЭС. При этом возможно производить разбиение структуры ОЭС по степени детализации конструктивных особенностей, по характеру отображаемых свойств отдельных элементов ОЭС (физической их природе), т.е. производить структурирование ОЭС на физически однородные системы. Процесс разбиения продолжается до тех пор, пока ОЭС и его модель не будут представлены в виде структур, представляющих собой совокупность СЧ: подсистем, узлов, элементов.

На каждом ИУ модель структуры ОЭС можно представить в виде субмоделей структурных частей ОЭС и связей между ними, как показано на рис. 6.

Субмодели СЧ описывают параметры и характеристики СЧ, которые являются внутренними параметрами, фазовыми переменными и выходными параметрами ОЭС. Связи представляют собой операторы (математические выражения), описывающие последовательный процесс преобразования сигнала, идущего от одной структурной части к другой. Эта совокупность субмоделей СЧ ОЭС и связей между ними должна удовлетворять условию выполнения целевой функции или показателям эффективности системы, заданных на начальном этапе моделирования в модуле «Показатели эффективности».

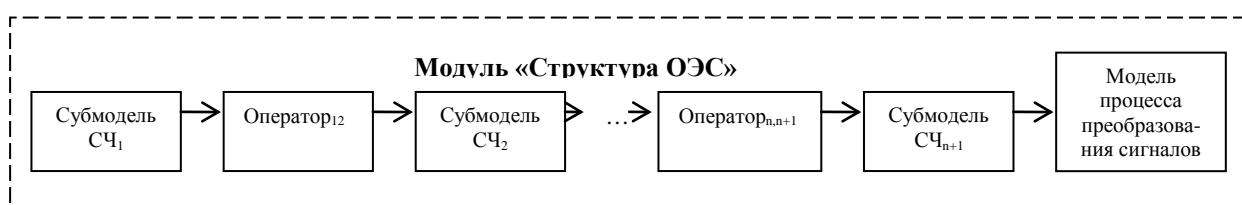


Рис. 6. Модуль «Структура ОЭС», представленный как совокупность субмоделей СЧ ОЭС и связей между ними

Для этого в БД КМ ОЭС должны быть представлены каталоги как базовых структур ОЭС и их спецификаций, так и субмодели отдельных СЧ ОЭС, например, широко известные модели и программы для расчета оптических систем (САРО, ОПАЛ, «ОПТИКА», «ПРИЗМА», «ВЫПУСК», «ФОТОЗЕНИТ», WinDemos, ZEMAX и др.), выражения для описания параметров и характеристик фотоприемных устройств, электронного тракта, систем отображения и других типовых СЧ ОЭС, содержащиеся в работах

Г.Г.Ишанина и Э.Д.Панкова, М.М.Мирошникова, Л.Ф.Порфирьева, Ю.Г.Якушенкова, L.C.Viberman, G.C.Holst и мн. др. и являющиеся аналитическими субмоделями этих СЧ.

Задача моделирования структурной схемы ОЭС сводится к формализации процедуры выбора субмоделей СЧ из множества возможных вариантов. При этом возможны следующие пути формирования структуры ОЭС: выбор готового варианта обобщенной структуры ОЭС из БД; возможные упрощения структуры ОЭС путем исключения избыточных или добавления требуемых СЧ из обобщенной структуры, находящейся в БД; перебор комбинаций элементов каталогов СЧ, из которых формируется структура ОЭС и последовательное наращивание структуры из элементов каталогов СЧ.

Использование каталогов БД позволяет проводить перебор возможных вариантов структуры ОЭС в комбинациях отношений «структура – показатель эффективности – целевая функция».

Одним из этапов формирования структуры ОЭС с помощью ее моделирования является оптимизация – выбор свойств системы, обеспечивающих заданное качество функционирования ОЭС при заданных ограничениях, или локальная оптимизация, которая подразумевает оптимизацию структурных частей ОЭС.

Общую методологию процесса создания модуля «Структура ОЭС» можно представить в виде совокупности следующих этапов:

1. Анализ ранее определенного в модуле «Показатели эффективности» перечня управляемых параметров и переменных, подлежащих моделированию в модуле «Структура ОЭС», и выбор способа их описания;
2. Представление структуры ОЭС в виде СЧ разных иерархических уровней;
3. Выбор из соответствующих разделов БД субмоделей параметров и переменных, запрашиваемых модулем «Показатели эффективности»;
4. Разработка или выбор операторов преобразования сигналов в структуре ОЭС;
5. Составление модели процесса преобразования сигналов;
6. Передача субмоделей параметров и переменных, субмоделей процесса преобразования сигналов в модуль «Результат работы КМ ОЭС» (в блок «Расчет показателей эффективности»), где они используются для расчета заданного или выбранного показателя эффективности;
7. Принятие решения о необходимости оптимизации ОЭС производится в модуле «Результат работы КМ ОЭС».
8. Повторение процедур п.п. 3-6 в случае проведения структурной или параметрической оптимизации ОЭС.

На рис. 7 приводится схема алгоритма работы с модулем «Структура ОЭС».

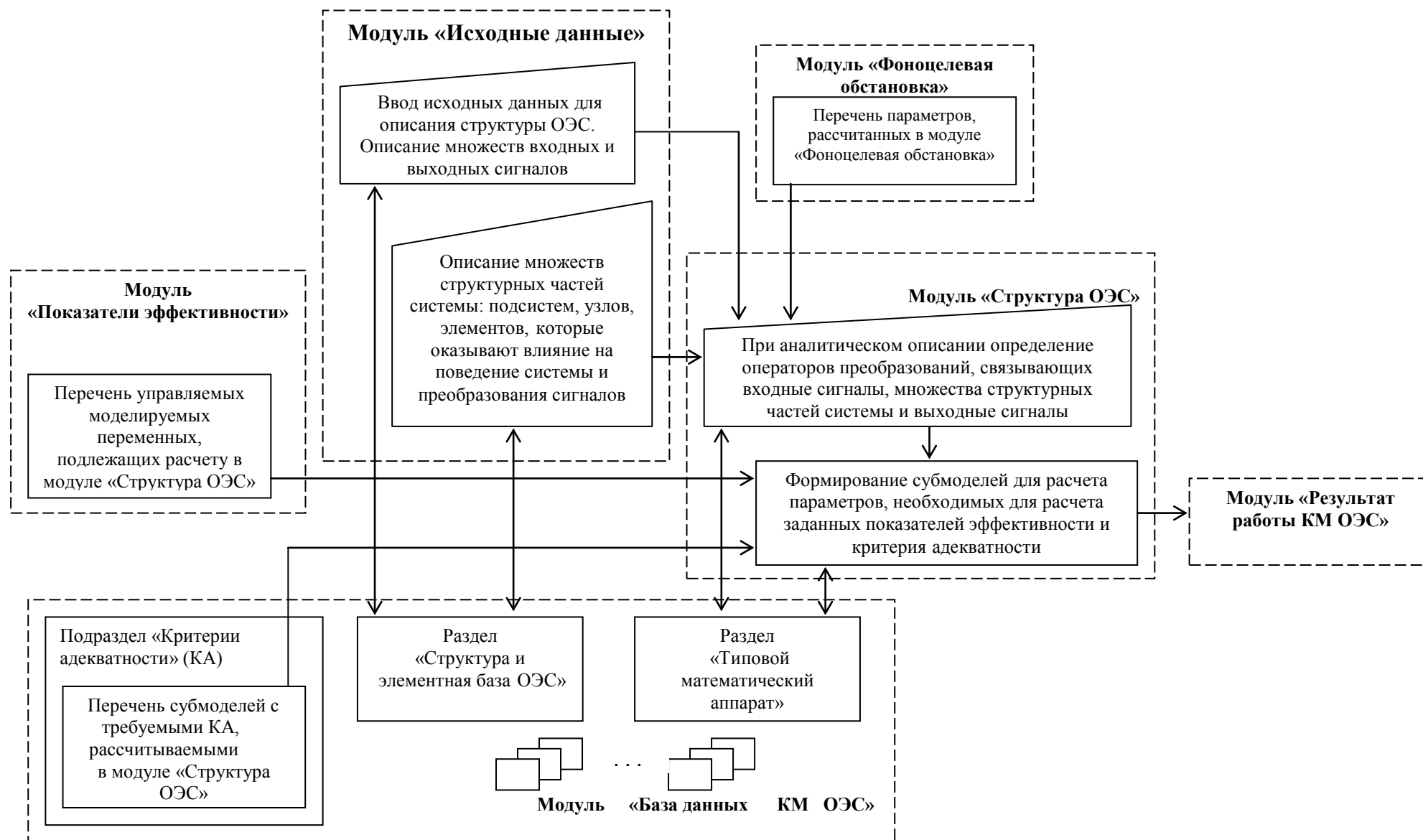


Рис. 7. Схема алгоритма работы с модулем «Структура ОЭС»

Модуль «Результат работы КМ ОЭС» объединяет в себе блоки: «Расчет показателей эффективности», «Расчет критерия адекватности», «Испытание модели» и «Представление результатов моделирования» (рис. 8).

Основой блока «Расчет показателей эффективности» являются выражения для расчета заданных в исходных данных показателей эффективности. На первых этапах моделирования они представляются в общем параметрическом виде. По мере работы в модулях «Фоноцелевая обстановка» и «Структура ОЭС» параметры, входящие в эти выражения, конкретизируются, определяется область их значений, и в данном блоке производится окончательный расчет.

Если результат расчета показателей эффективности не удовлетворяет пользователя, производится параметрическая или структурная оптимизация ОЭС. Для этого предусматриваются известные и неоднократно описанные алгоритмы оптимизации и обратная связь с модулями «Структура ОЭС» и «Исходные данные». Алгоритмы и способы оптимизации структуры ОЭС могут выбираться из соответствующего раздела «Оптимизация структуры ОЭС» БД КМ ОЭС. Если выбранные или заданные средства оптимизации структуры всей ОЭС или отдельных её СЧ, а также параметров и характеристик этих СЧ оказались неэффективными, т.е. требуемое значение показателя эффективности моделируемой ОЭС не достигнуто, необходимо возвращаться в модуль «Исходные данные» и производить корректировку этих данных.

После получения удовлетворительных результатов расчета показателей эффективности ОЭС обязательно должен проводиться контрольный расчет критерия адекватности (КА) в блоке «Расчет критерия адекватности», подтверждающий адекватность модели ОЭС по заданному в исходных данных критерию. Если модель не удовлетворяет заданному значению КА, то производится анализ причин неадекватности и оптимизация КМ ОЭС. Оптимизация может заключаться, например, в ином распределении значения КА между КА субмоделей отдельных узлов ОЭС и субъектов ФЦО.

В блоке «Испытание модели» размещаются алгоритмы, позволяющие осуществлять испытания КМ ОЭС посредством имитационного эксперимента. В случае удовлетворительных результатов испытаний модели производится представление результатов моделирования (блок «Представление результатов моделирования»), т.е. формирование выходных данных о результатах моделирования системы в форме представления, заданной в исходных данных, и подготовка документации на разработанную КМ ОЭС - паспорт пригодности.

Структура обобщенной КМ ОЭС должна также иметь базу данных (БД), объединяющую разделы, относящиеся к отдельным модулям КМ ОЭС, алгоритмам функционирования ОЭС и её СЧ и математическому аппарату, используемому при моделировании (см. рис. 3, 5-9). В частности раздел БД «Результаты работы КМ ОЭС» содержит подразделы: «Критерии адекватности», «Оптимизация структуры ОЭС», «Испытания модели», «Формы представления результатов моделирования».

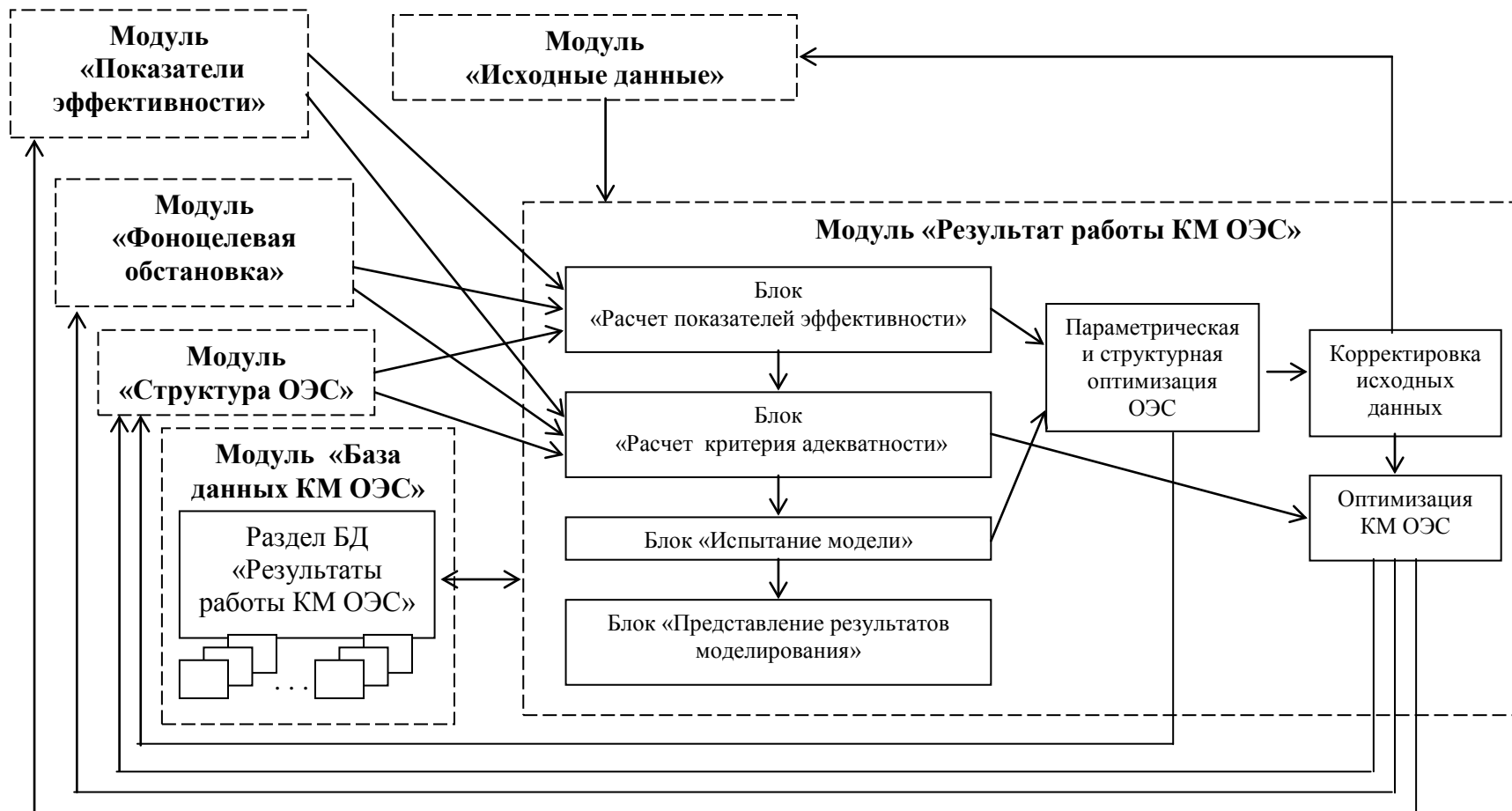


Рис. 8. Схема алгоритма работы в модуле «Результат работы КМ ОЭС»

Состав БД во многом можно определить исходя из анализа выражений для показателей эффективности ОЭС, которые зависят от параметров и характеристик как ФЦО, так и СЧ моделируемой ОЭС. При её формировании и использовании необходимо учитывать следующие факторы:

- необходимость описания большого объема разнородной по характеру информации;
- возможность обеспечения работы разными способами: диалоговый и автоматический режимы поиска и считывания данных по запросам из других модулей программы;
- обеспечение возможностей выбора формы представления данных без дополнительной их подготовки для исключения увеличения занимаемого объема памяти внутри БД, исключения усложнения КМ ОЭС и временных затрат;
- необходимость перевода данных из одной формы представления в другую с сохранением адекватности информации;
- соответствие условий выбора данных из БД их размещению в структуре БД независимо от используемой формы представления.

Как правило, модель должна использовать хорошо освоенное широким кругом пользователей программное обеспечение, включающее в себя многоуровневый дружественный интерфейс пользователя. В общем случае интерфейс должен обеспечивать следующие операции при работе с моделью: ввод и формирование исходных данных; преобразование элементов КМ ОЭС к виду, пригодному для использования в модели; изменение вида и характера связей между элементами системы; обработка и анализ результатов моделирования; возможность управления порядком работы с КМ ОЭС.

В главе 3 рассматриваются критерии адекватности КМ ОЭС и методы их аналитической и экспериментальной оценки.

Одним из основных требований, которым должна удовлетворять КМ ОЭС, является адекватность. Она характеризуется достоверностью отображения в модели некоторых заданных свойств ОЭС и условий её функционирования. Адекватность целесообразно оценивать 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 работы ОЭС.

В процессе оценки адекватности модели, которая может быть получена аналитическим путем или с помощью натурального эксперимента, целесообразно получить характеристику адекватности - зависимость изменения КА модели от изменений величин параметров и характеристик ОЭС. Эта характеристика может быть полезной при оптимизации структуры и элементной базы ОЭС, а также при определении устойчивости (области адекватности) КМ ОЭС, определяемой граничными значениями входных данных модели, например, условиями работы ОЭС, при которых КМ ОЭС отвечает требованиям адекватности. Зная характеристики адекватности, можно также составить

модели адаптивных ОЭС, структура и параметры которых изменяются для обеспечения заданного КА.

По известным или рассчитанным значениям КА можно также выдвигать требования к точности задания исходных данных на моделирование ОЭС, к адекватности данных, находящихся в БД, а также к форме их представления, например, к шагу дискретизации данных.

На начальных уровнях проектирования КА модели целесообразно оценивать по отклонению показателя эффективности работы ОЭС от заданного или требуемого его значения. Поскольку такое отклонение зависит от изменения параметров и характеристик ОЭС, то для расчета КА можно воспользоваться методом полного дифференциала выражения, описывающего заданное свойство ОЭС, например, заданный показатель эффективности работы системы. Отдельные составляющие полного дифференциала (частные производные) определяются параметрами отдельных структурных частей ОЭС и критериями адекватности субмоделей, из которых состоит КМ ОЭС. Анализируя выражение, описывающее КА всей модели через эти составляющие, можно определить требования к КА отдельных субмоделей, рассчитываемых аналогичным методом.

Возможная схема учета КА в модели приведена на рис. 9 и заключается в следующем:

1. Пользователь в соответствии с исходными данными вводит требуемое значение критерия адекватности, которое должна обеспечивать КМ ОЭС.

2. Из раздела базы данных «Критерии адекватности» выбирается выражение для полного дифференциала требуемого критерия адекватности от параметров отдельных структурных частей ОЭС и субъектов ФЦО.

3. Заданное значение критерия адекватности распределяется между значениями критериев адекватности субмоделей модулей «Структура ОЭС» и «Фоноцелевая обстановка».

4. Пользователь выбирает из соответствующих разделов базы данных «Фоноцелевая обстановка» и «Структура ОЭС» субмодели, которые после подстановки в них значений параметров СЧ ОЭС обеспечивают полученные в п.3 значения критериев адекватности. Эти субмодели используются в дальнейшем при моделировании.

5. Производится контрольный (окончательный) расчет критерия адекватности в отдельном блоке модуля «Результат работы КМ ОЭС», схемы работы с которым приведены на рис. 7 и 9. Этот расчет, в частности необходим, если при оптимизации структуры системы проводилась замена СЧ ОЭС (узлов, элементов) и были произведены соответствующие изменения в используемых субмоделях в модуле «Структура ОЭС».

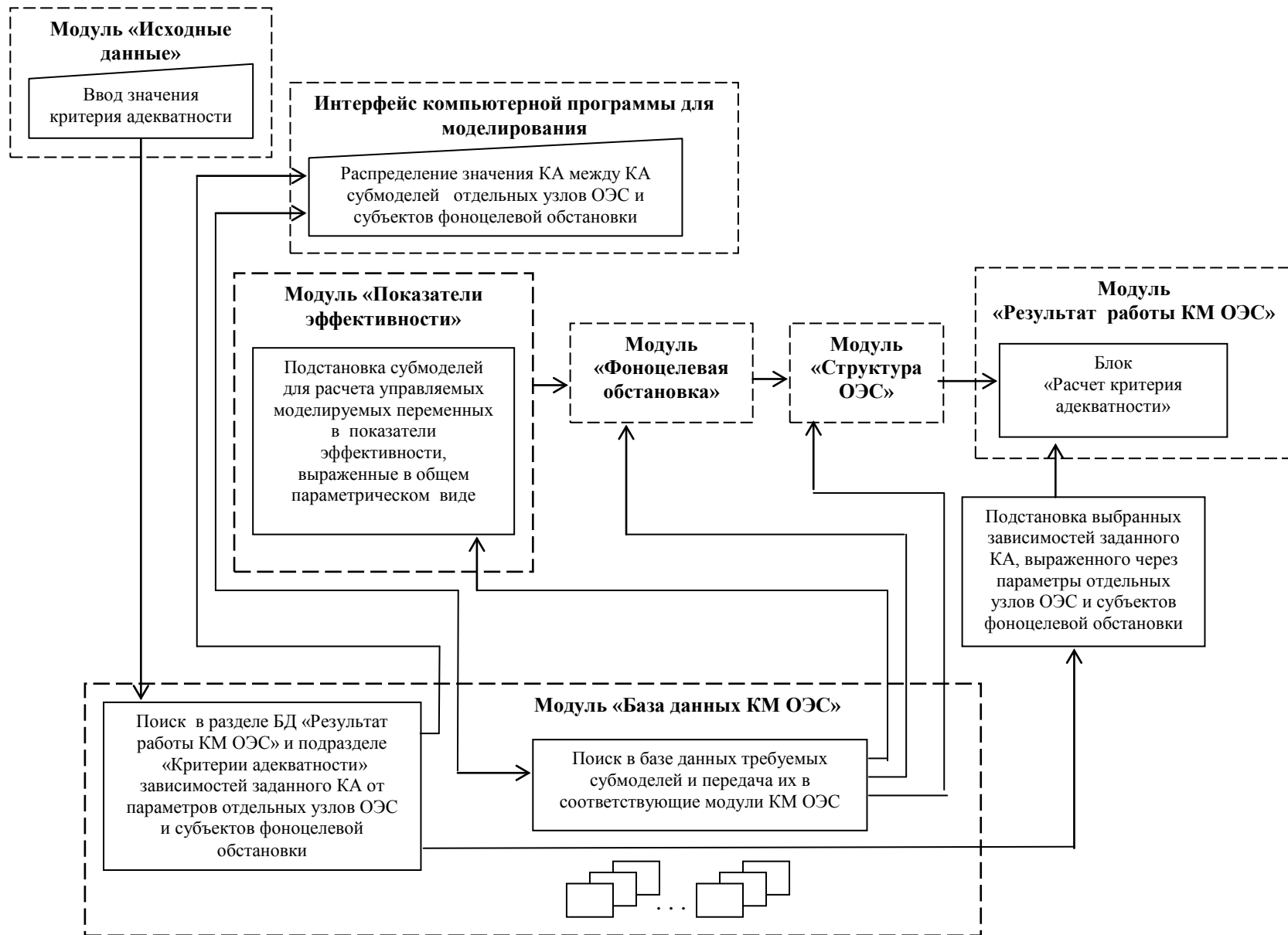


Рис. 9. Схема учета критерия адекватности в КМ ОЭС

6. В случае, если расчетное значение КА не удовлетворяет требованиям исходных данных для моделирования, необходимо провести оптимизацию КМ ОЭС (рис.10). Под оптимизацией КМ ОЭС понимаются процедуры поиска наилучших решений: изменение её структуры, построение и выбор алгоритмов расчета и др., использование которых обеспечивало бы заданные требования к КМ ОЭС. Эти операции также выделены в отдельный блок в составе модуля «Результат работы КМ ОЭС».



Рис. 10. Схема оптимизации КМ ОЭС из условия адекватности модели

Аналитический метод проверки адекватности КМ ОЭС, используемый в отсутствие реально существующего объекта-оригинала, может состоять:

- в сравнении результатов экспериментов, промоделированных с помощью рассматриваемой КМ ОЭС, и экспериментов, проведенных с помощью эталонной компьютерной модели исследуемой ОЭС - модели с заданными и полностью определенными параметрами и характеристиками, без учета их вариаций, неопределенностей статистического характера и т.д. При этом используется идеализация, т.е. замещение реального эмпирического явления или объекта идеализированной схемой. В эталонной компьютерной модели могут использоваться математические модели, заведомо более точные, чем в испытуемой.

- в моделировании частных случаев, для которых заранее известны решения или результаты,

- путем проверки адекватности отдельных субмоделей КМ ОЭС.

Экспериментальная проверка адекватности КМ ОЭС может проводиться путем проверки устойчивости модели при изменяющихся условиях работы ОЭС, имитируемых в процессе эксперимента. Только в последнее время в зарубежной периодике появились сведения об экспериментальной проверке адекватности КМ ОЭС. Однако, эта проверка проводилась для моделей ОЭС, решающих сугубо конкретные (частные) задачи. Она базировалась на сложном, объемном и поэтому дорогостоящем натурном эксперименте.

Основные этапы экспериментальной проверки адекватности КМ ОЭС могут состоять в следующем.

Первым этапом может быть отбор наиболее часто встречающихся ФЦО - сценариев работы ОЭС. Поскольку для многих ОЭС число возможных сценариев огромно, следует отобрать наиболее типичные и важные для оценки адекватности КМ ОЭС. При этом важно отобрать из большого числа параметров и характеристик излучателей (целей, фонов, помех) и других субъектов ФЦО наиболее существенные, например геометрические размеры и пространственную структуру, яркость, контраст, а также установить или сформулировать требования к статистическим характеристикам наблюдаемой ФЦО (сцены).

Вторым этапом может быть выбор показателей эффективности работы ОЭС, модели которых проверяются в процессе эксперимента. Аналитические выражения для вычисления этих показателей, представленные в виде функций параметров и характеристик собственно ОЭС, а также ФЦО, в которой работает система, часто принимаются за модель ОЭС.

Следующим этапом может быть собственно эксперимент по определению заданного или выбранного показателя или показателей эффективности работы ОЭС. Здесь целесообразно проведение испытаний или измерений как для идеализированных (эталонных) условий, соответствующих выбранной математической модели ОЭС, как основы ее компьютерного моделирования, так и для возможных изменяющихся условий работы системы, вызываемых, обычно, изменениями ФЦО, например изменением дальности до цели, изменением ее контраста на фоне, изменением структуры фона и т.д.

Например, ухудшение качества изображения, создаваемого ОЭС, можно имитировать вводом гауссовской функции рассеяния вида $\exp[-\pi(x/b)^2]$ в передаточную функцию ОЭС – ее функцию передачи модуляции (ФПМ). Здесь параметр b определяет размытие изображения. Для ОЭС с матричными приемниками целесообразно выражать b числом пикселей, занимаемых размытым изображением. При увеличении b ФПМ «сжимается», снижая информативность изображения.

Для каждого неразмытого (эталонного) изображения целесообразно проводить сегментацию цели на фоне путем создания маски цели с весами пикселей, перекрывающих площадь цели, равными 1, и равными 0 для всей площади фона. Контраст можно определять как

$$K = \frac{\sqrt{\sigma_y^2 + (n_n - n_\phi)^2}}{2n_{cn}}, \quad (3)$$

где n_n и n_ϕ - средние числа пикселей в изображениях цели и фона, соответственно; σ_y^2 - дисперсия числа пикселей, занимаемых изображением цели; n_{cn} - усредненное число пикселей, занимаемых целью и локальным фоном.

Локальный фон определяется как площадь сцены, смежная с целью, но не включающая ее.

На заключительном этапе ведется проверка устойчивости (адекватности) модели при изменяющихся условиях работы ОЭС, имитируемых в процессе эксперимента.

Сопоставление рассчитанных с помощью КМ показателей эффективности работы ОЭС со значениями, полученными в результате эксперимента, позволяет судить об адекватности КМ.

Глава 4 посвящена особенностям компьютерного моделирования некоторых современных ОЭС: двух- и многодиапазонных, т.е. работающих в двух и более спектральных диапазонах; систем, работающих активным методом; систем дистанционного зондирования.

Компьютерная модель многодиапазонной ОЭС (КМ МОЭС), может быть построена на основе обобщенной КМ ОЭС. Для моделирования МОЭС необходимо иметь субмодели отдельных узлов МОЭС, алгоритмы обработки сигналов, учитывающие их специфику, параметры и характеристики отдельных узлов МОЭС и т.п. Они могут задаваться в исходных данных, размещаться в соответствующих модулях, но более целесообразным является их размещение в отдельном разделе БД «Двух- и многодиапазонные ОЭС» модуля «База данных обобщенной КМ ОЭС». В этом разделе данные (алгоритмы, субмодели, параметры и характеристики и др.) должны быть систематизированы по подразделам, соответствующим отдельным модулям КМ ОЭС. При моделировании МОЭС эти подразделы могут быть активизированы при непосредственном обращении к ним пользователя или при установлении автоматических считываний из запрашиваемых модулей КМ ОЭС.

Для оценки эффективности функционирования МОЭС используются специальные показатели, которые должны быть размещены в БД. Ими могут быть, например, спектральный контраст, разность оптических сигналов, спектральное отношение, логарифмические спектральные отношения на входе системы, приведенные к её выходу или выходу ПИ.

В достаточно общем виде сигнал на выходе приемника излучения, со спектральной чувствительностью S_{λ_i} на длине волны λ_i , определяемый только собственным излучением объекта, описывается как

$$U_i = K \cdot \varepsilon_{\lambda_i} L_{\lambda_i} \tau_{0\lambda_i} S_{\lambda_i}, \quad (4)$$

где K – постоянная, определяемая геометрооптическими параметрами ОЭС, не зависящими от длины волны излучения; ε_{λ_i} и L_{λ_i} – спектральная излучательная способность и яркость объекта, соответственно; $\tau_{0\lambda_i}$ – коэффициент пропускания оптической системы на длине волны λ_i .

Соответствующее $R_{\Delta\lambda}$ отношение сигналов на выходе ПИ $R_u=U_1/U_2$ для двух рабочих спектральных диапазонов равно

$$R_u = \frac{\int_{\Delta\lambda_1}^{\Delta\lambda_2} \varepsilon(\lambda)\tau_0(\lambda)S(\lambda)\lambda^{-5} \exp(-c_2/\lambda T)d\lambda}{\int_{\Delta\lambda_2}^{\Delta\lambda_1} \varepsilon(\lambda)\tau_0(\lambda)S(\lambda)\lambda^{-5} \exp(-c_2/\lambda T)d\lambda}, \quad (5)$$

где $\Delta\lambda_1$ и $\Delta\lambda_2$ – рабочие спектральные диапазоны. Здесь используется упрощенная форма закона Планка

$$L_\lambda = \frac{1}{\pi} c_1 \lambda^{-5} \exp(c_2/\lambda T), \quad (6)$$

где c_1 и c_2 – постоянные закона Планка; T – температура объекта.

Схемы алгоритмов работы с модулями «Показатели эффективности», «Фоноцелевая обстановка», «Структура МОЭС», «Результат работы КМ ОЭС» при моделировании МОЭС приведены на рис. 11-14.

При моделировании ОЭС, работающих активным методом, в обобщенную КМ ОЭС целесообразно добавить субмодели (разделы отдельных модулей и базы данных обобщенной КМ ОЭС), описывающие передающую оптическую систему, включая источник подсветки и отображающие особенности распространения оптического сигнала на пути от передающей системы к приемной.

Удобно строить модель такой системы по схеме, представленной на рис. 15, в соответствии с которой ФЦО может описываться в едином для всех каналов модуле «Фоноцелевая обстановка», т.е. с помощью единой и достаточно широкой системы параметров и характеристик (геометрические размеры, дальности, форма, физико-химические свойства поверхностей и мн. др.), а с помощью интерфейса пользователя выбирается любой из спектральных «пассивных» или «активных» каналов и соответственно ему синтезируется (строится) сигнал, поступающий на вход субмодели «Структура ОЭС».

Компьютерная модель многих ОЭС дистанционного зондирования, предназначенных для обнаружения различных объектов на случайно-неоднородном («пестром») фоне, также может базироваться на обобщенной КМ ОЭС, в модуль «Исходные данные» которой следует ввести такие показатели эффективности, как вероятности правильного обнаружения и ложных тревог, а также геометрооптические параметры схемы работы ОЭС.

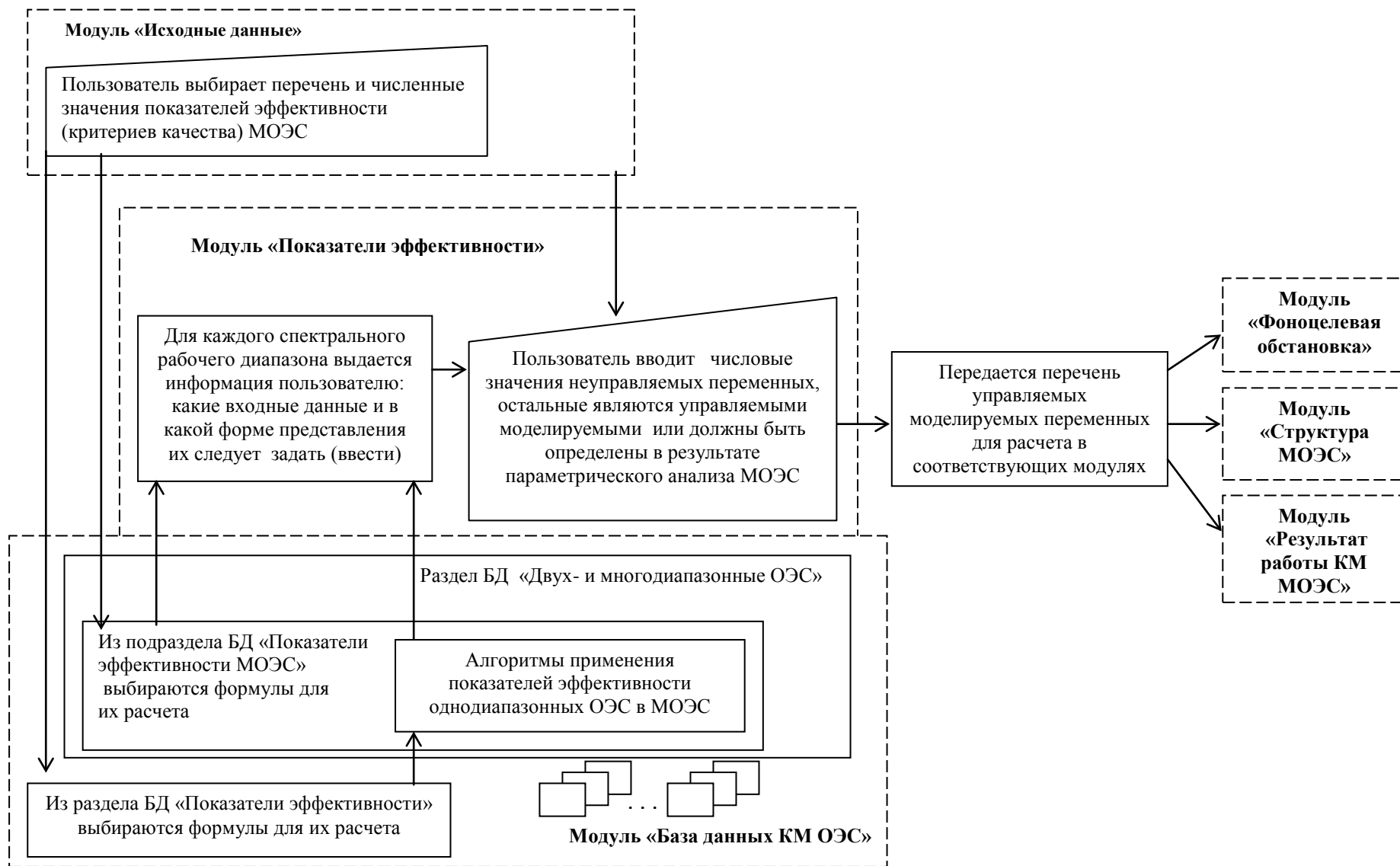


Рис. 11. Схема алгоритма работы с модулем «Показатели эффективности» при моделировании МОЭС

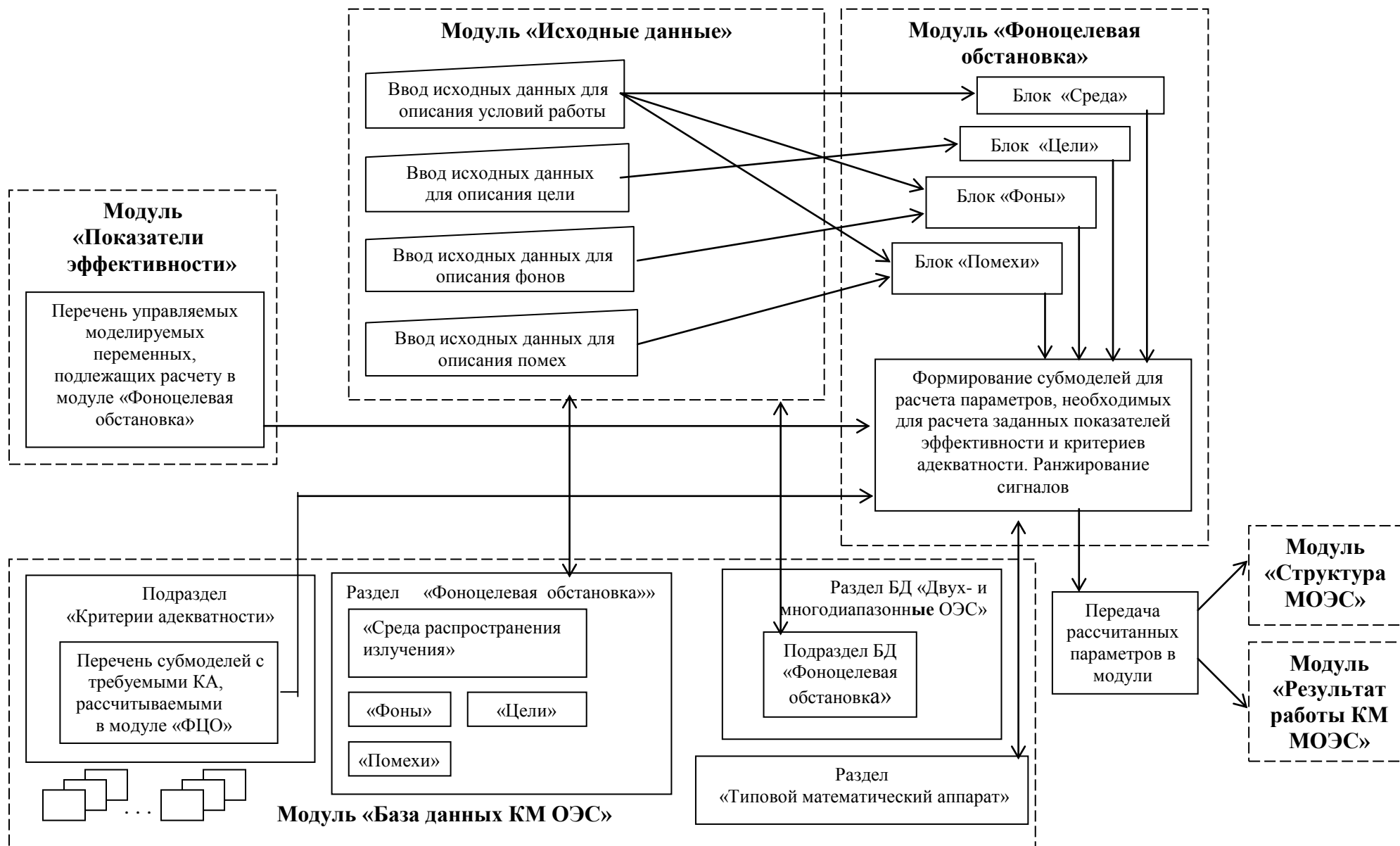


Рис. 12. Схема алгоритма работы с модулем «Фоноцелевая обстановка» при моделировании МОЭС

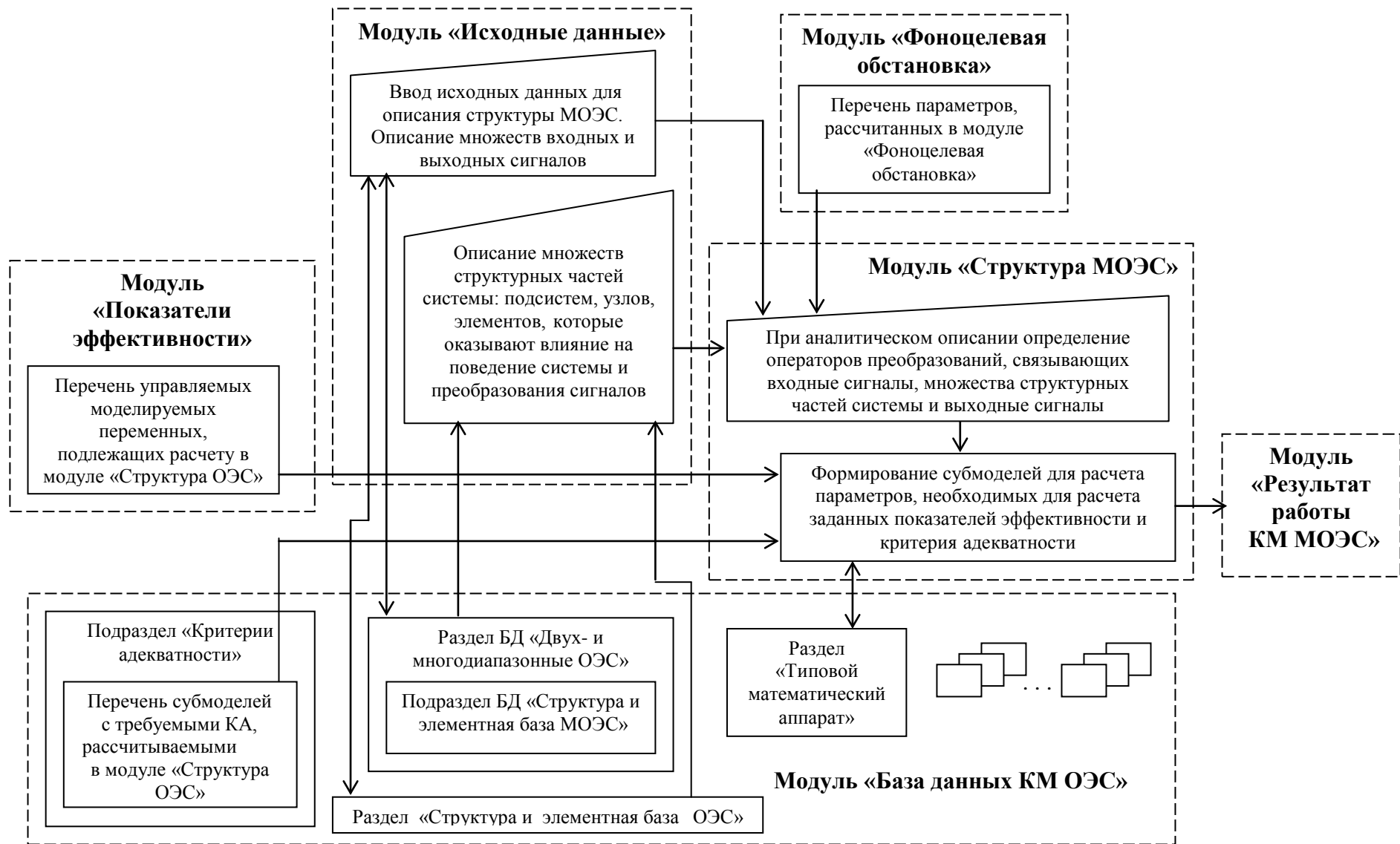


Рис. 13. Схема алгоритма работы с модулем «Структура МОЭС» при моделировании МОЭС

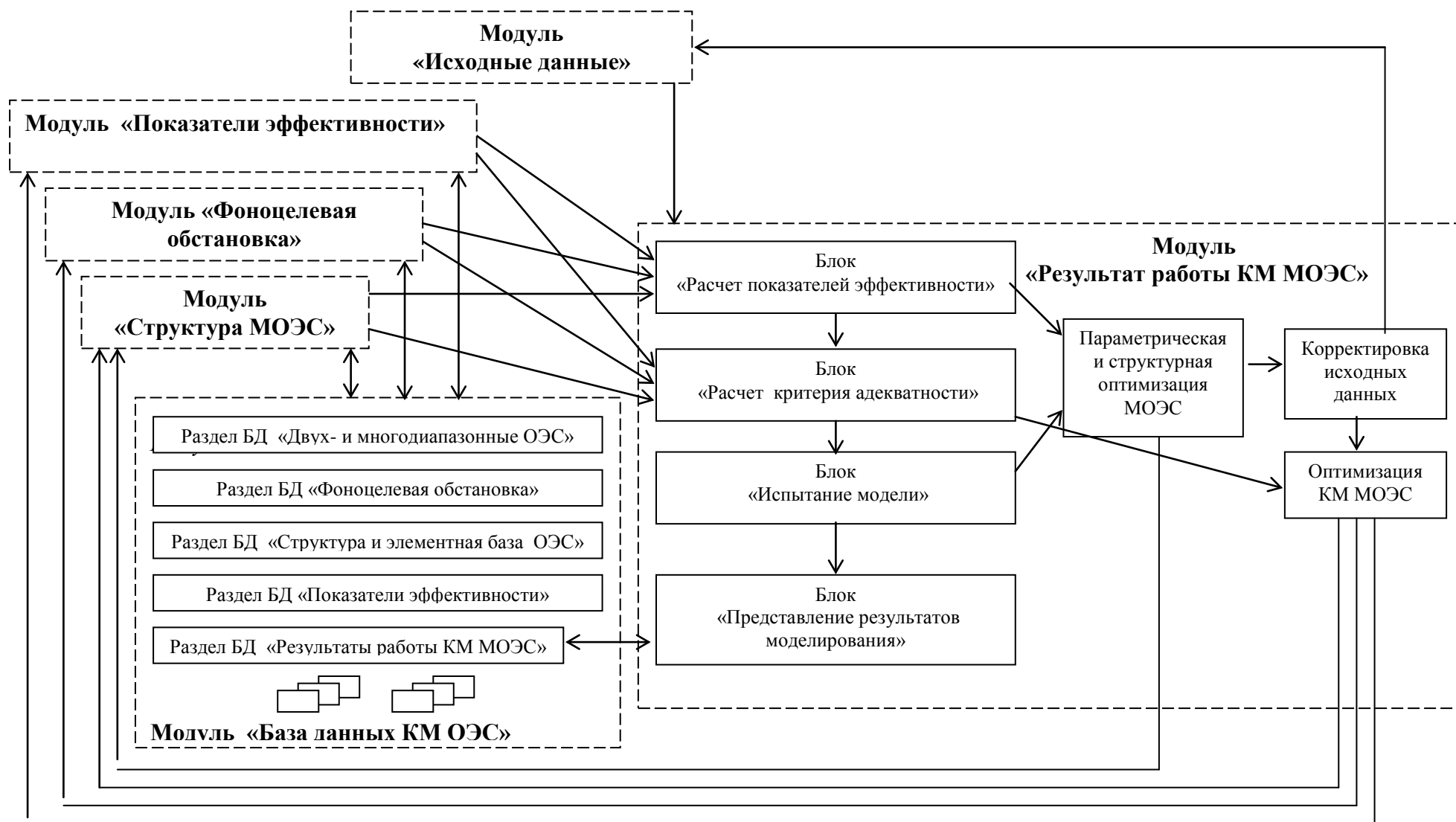


Рис. 14. Схема алгоритма работы с модулем «Результат работы КМ ОЭС» при моделировании МОЭС

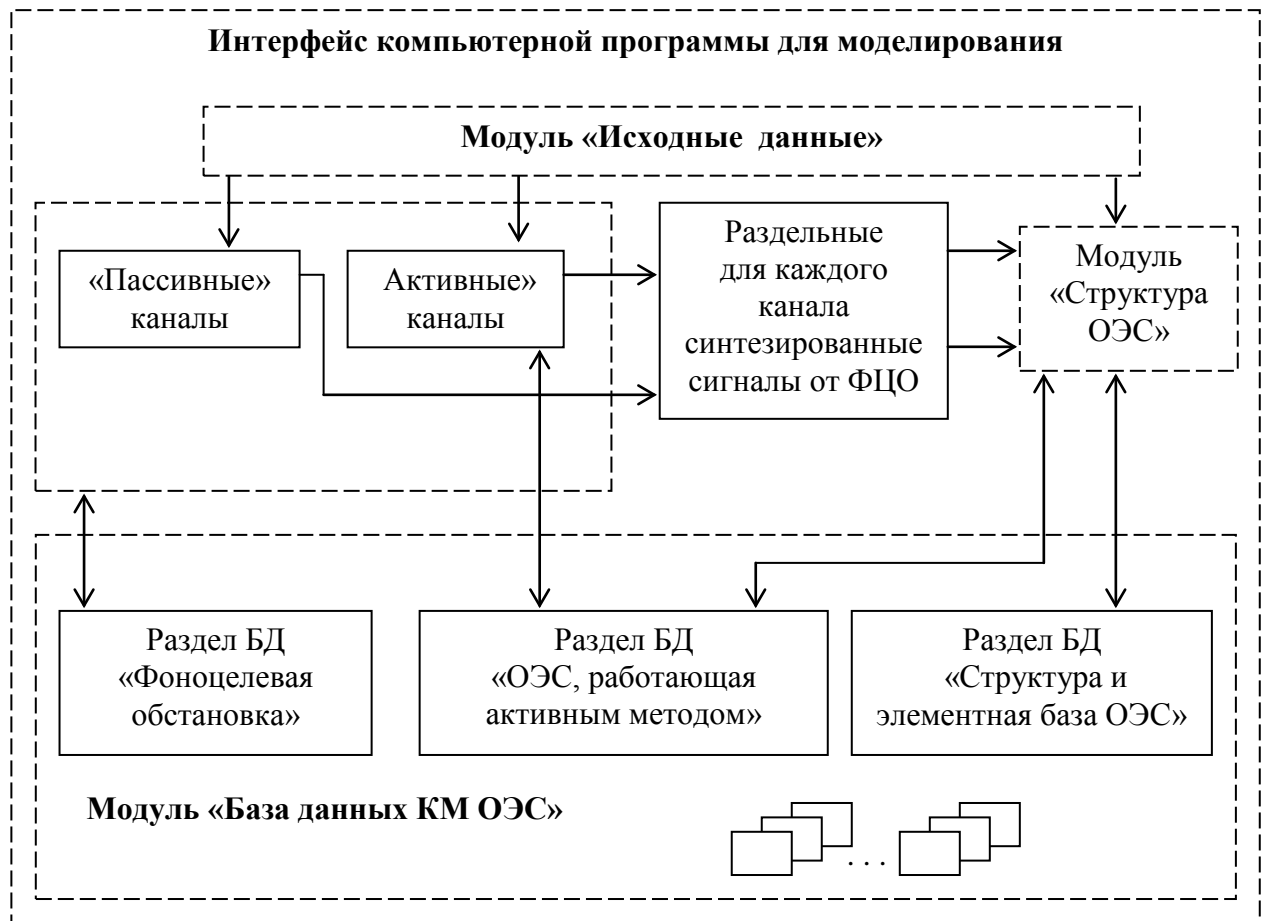


Рис. 15. Обобщенная схема моделирования многоканальной ОЭС

Пользуясь основными положениями изложенной методологии компьютерного моделирования, в процессе работы над диссертацией была создана КМ дистанционного зондирования для оценки дальности обнаружения объекта на случайном неоднородном фоне при условии обеспечения заданной вероятности обнаружения объекта.

В этом случае зависимость отношения сигнал-шум μ от дальности l , являющаяся аналитической моделью ОЭС, имеет вид:

$$\frac{\mu(l)}{\mu(l_0)} \approx \frac{l_0}{l} \cdot \frac{1 - \exp\left\{-0,5 \left[\frac{S_{об}(l)}{2\sigma_s(l)}\right]^2\right\}}{1 - \exp\left\{-0,5 \left[\frac{S_{об}(l_0)}{2\sigma_s(l_0)}\right]^2\right\}} \cdot \exp\left[-\tau_{ср}(l-l_0)\right], \quad (7)$$

где l_0 – некоторая номинальная или нормирующая дальность обнаружения, при которой $\mu=1$; $S_{об}$ – видимый размер объекта; σ_s – размер кружка рассеяния, вызванного влиянием дифракции и aberrаций, атмосферными явлениями (рассеянием, турбулентностью), вибрациями основания и другими факторами; $\tau_{ср}$ – среднее значение показателя ослабления среды, в которой проходит трасса «объект-ОЭС».

Глава 5 посвящена краткому описанию компьютерных моделей ОЭС «КОМОС» и «КМ ОЭС», разработанных в МИИГА и К на кафедре оптико-электронных приборов.

Модель «КОМОС» позволяет моделировать ФЦО работы ОЭС классов «земля-земля», «земля-воздух», «воздух-земля», «воздух-водная поверхность».

Модель написана в среде Turbo Basic. В ней имеются базы данных оптических систем, приемников излучения, анализаторов изображения и некоторых элементов электронного тракта.

Компьютерная модель «КОМОС», разработанная в соответствии с изложенной в предыдущих главах методологией, подтвердила свою адекватность путем сравнения результатов проведенных численных экспериментов на модели и натуральных экспериментов с рядом тепловизионных систем.

Рассчитанные с помощью модели значения отношения сигнал-шум порядка 2,1 обеспечивают надежное распознавание тест-объекта на дальности до 2 км, а при отношении сигнал-шум порядка 10 его идентификацию на дальностях до 5 км.

Дальности распознавания и идентификации объекта, полученные экспериментальным путем, отличались от рассчитанных не более чем на 12...15%, что свидетельствовало о хорошей адекватности модели.

В последние годы на базе модели «КОМОС» была разработана новая компьютерная программа для моделирования ОЭС первичной обработки информации, названная «КМ ОЭС». Последняя версия модели разработана средствами MatLab и позволяет осуществлять моделирование ОЭС, работающих в нескольких спектральных диапазонах, для различных фоноцелевых ситуаций. В ней имеется возможность описания многомерных систем, а также достаточно простая перестройка решения поставленных задач.

Структура «КМ ОЭС» построена с учетом принципа модульности, иерархичности и вложенности модулей друг в друга. Основными модулями «КМ ОЭС» являются: «Исходные данные», «Показатели эффективности», «Фоноцелевая обстановка», «Структура ОЭС», «База данных КМ ОЭС» и «Результат работы КМ ОЭС».

На рис. 16 приведен вид интерфейса при вводе исходных данных в модель.

Возможные составляющие излучения на входном зрачке ОС, задаваемые как входные параметры для модуля «Фоноцелевая обстановка» модели, представлены на рис. 17.

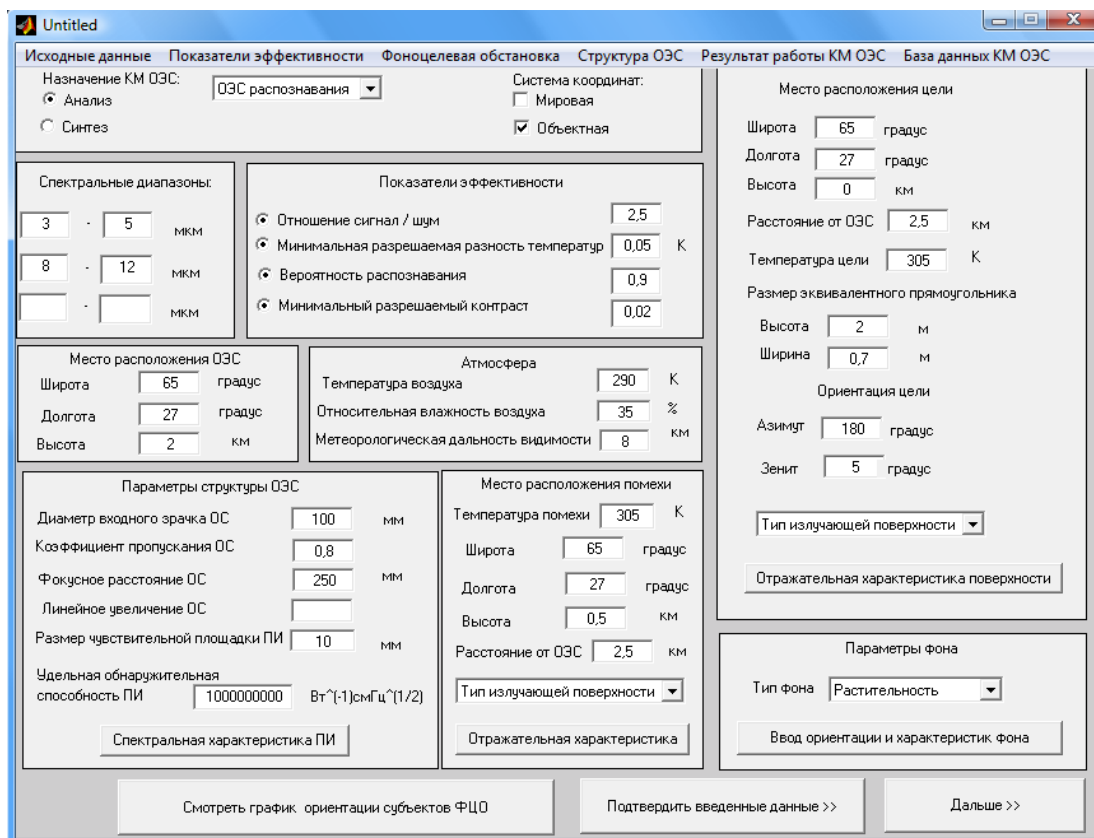


Рис. 16. Вид интерфейса ввода исходных данных в модели «КМ ОЭС»

Модель «КМ ОЭС» содержит два канала (спектральных диапазона) – тепловизионный, разбиваемый на отдельные поддиапазоны, и визуальный. С ее помощью по заданию ЦНИИ Точмаш проводилась оценка эффективности камуфляжа и маскировки различных объектов, наблюдаемых на фоне естественных помех.

С использованием этой модели, зная тактико-технические параметры и характеристики современных ОЭС или задаваясь ими, оказалось возможным рассчитать пороговые значения контрастов температур, излучательных и отражательных способностей объектов, регистрируемых этими системами, а следовательно, установить необходимый уровень снижения этих контрастов с целью повысить эффективность средств камуфляжа и маскировки.

В модель введены алгоритмы расчета минимальной разрешаемой разности температур, отношения сигнал-шум и зависимостей вероятностей обнаружения, распознавания и идентификации цели от дальности до нее, а также от различных конструктивных параметров ОЭС. На рис. 18 и 19 приводятся вид интерфейса и диаграммы зависимостей вероятностей обнаружения, распознавания и идентификации от дальности в тепловизионном канале и в визуальном канале, полученные в результате моделирования.

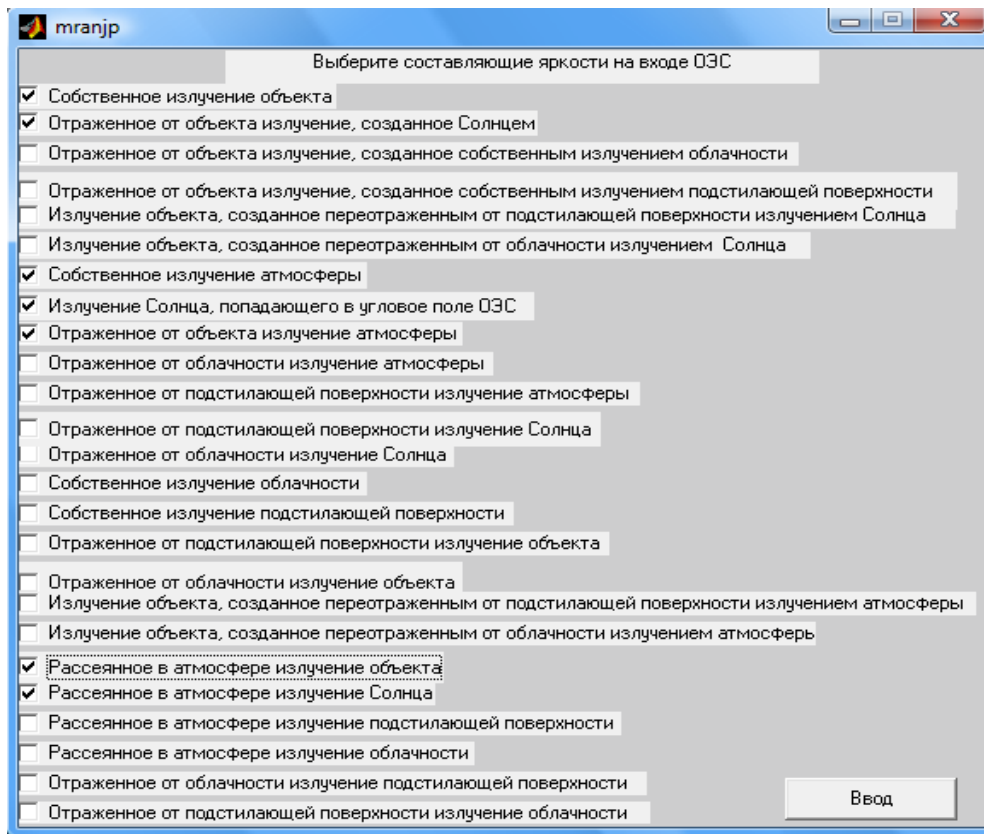


Рис. 17. Окно задания составляющих излучения на входном зрачке оптической системы в «КМ ОЭС»

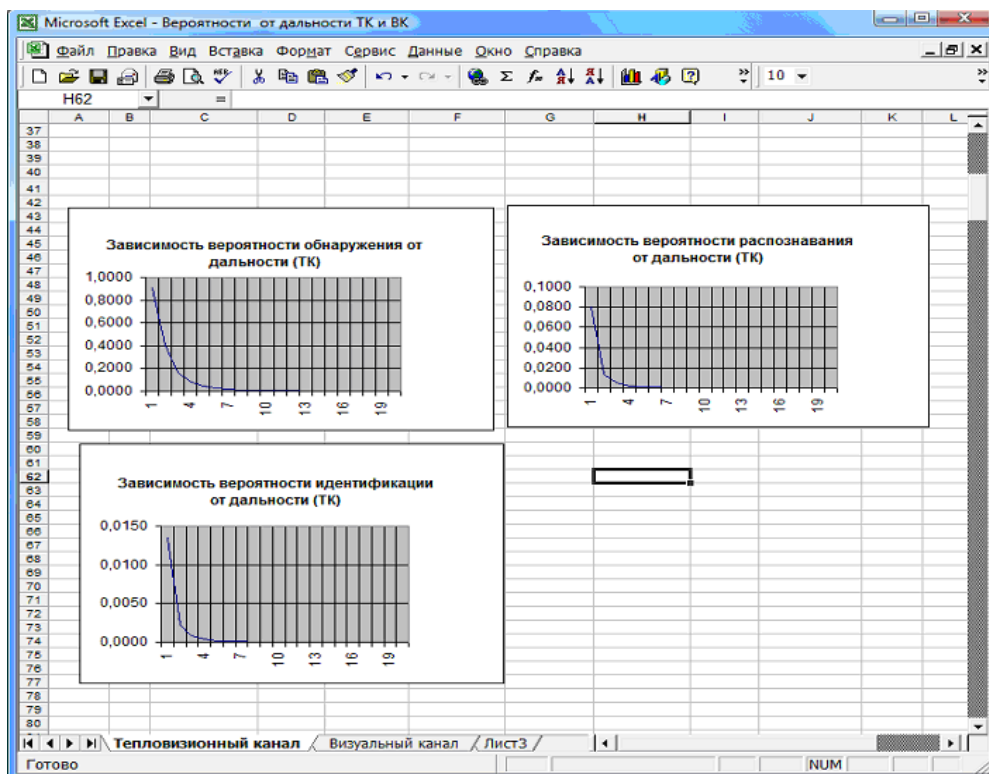


Рис. 18. Диаграммы зависимостей вероятностей обнаружения, распознавания и идентификации от дальности в тепловизионном канале

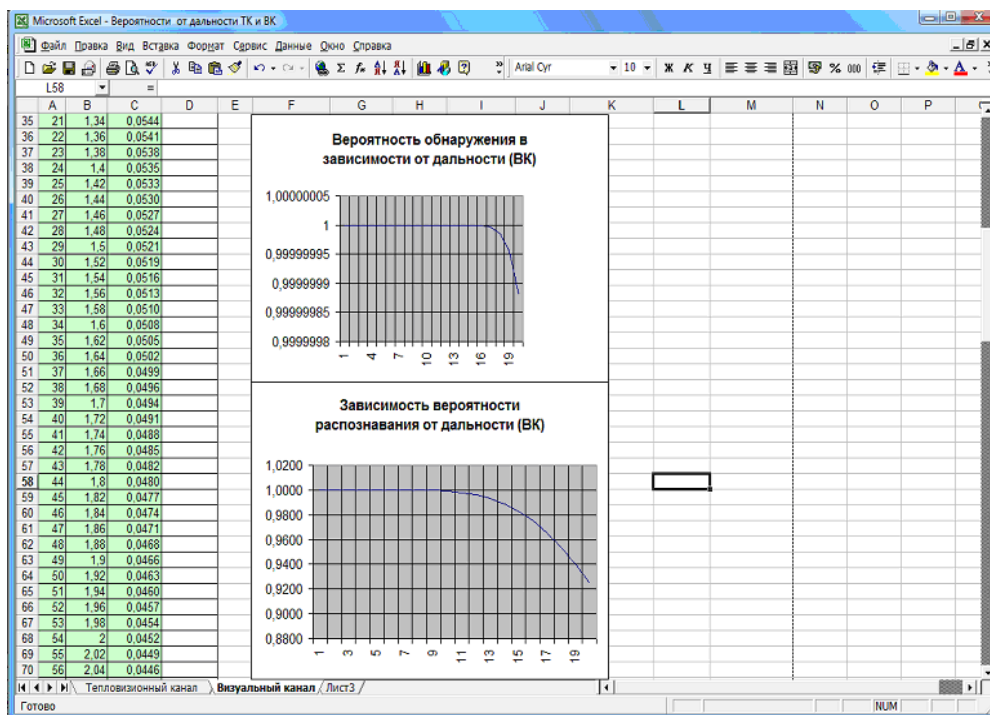


Рис. 19. Диаграммы зависимостей вероятностей обнаружения и распознавания от дальности в визуальном канале

Предлагаемая методология позволяет проводить дальнейшее развитие разрабатываемой модели «КМ ОЭС» вводом дополнительных модулей, описанных в методологии, установления связей между ними, и реализации в системе MatLab.

Проведенные эксперименты с «КМ ОЭС», в частности, при выполнении НИР «Разработка компьютерной модели для оценки эффективности средств маскировки в оптическом диапазоне спектра», подтверждают ее гибкость и возможность использования ее для решения новых задач моделирования.

В приложении приводятся рекомендации по выбору программных средств для компьютерной модели оптико-электронных систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая методология компьютерного моделирования позволяет использовать её при проектировании и исследовании разнообразных ОЭС на начальных этапах их проектирования. Проведенные исследования и разработки, результаты которых изложены в настоящей диссертации, позволяют сделать следующие основные выводы.

1. Предложенная структура обобщенной компьютерной модели оптико-электронных систем (КМ ОЭС), включающая в себя в качестве основных модулей «Исходные данные», «Показатели эффективности», «Фоноцелевая обстановка», «Структура ОЭС», «База данных КМ ОЭС»,

«Результат работы КМ ОЭС», является основой для начального этапа моделирования вновь разрабатываемых ОЭС.

2. Основными этапами компьютерного моделирования ОЭС являются:

– представление показателей эффективности работы системы, содержащихся в техническом задании на разработку, в общем параметрическом виде путем обращения к субмоделям модулей «Фоноцелевая обстановка», «Структура ОЭС», «База данных КМ ОЭС»;

– расчет показателей эффективности в модуле «Результат работы КМ ОЭС»;

– сопоставление результатов расчета с заданными значениями;

– проведение параметрической или структурной оптимизации ОЭС в случае, если полученные результаты не удовлетворяют пользователя. Для этого используются алгоритмы оптимизации и обратная связь с модулями «Структура ОЭС» и «Исходные данные», содержащаяся в обобщенной КМ ОЭС;

– проведение контрольного расчета критерия адекватности в соответствующем блоке модуля «Результат работы КМ ОЭС» при получении удовлетворительных результатов расчета показателей эффективности.

3. Общую методологию процесса создания отдельных модулей можно представить в виде совокупности следующих этапов:

– выбор показателей эффективности и (или) целевой функции, наилучшим образом отображающих требования к модулю;

– выбор управляемых и неуправляемых переменных для задачи моделирования;

– определение перечня требуемых выходных параметров модуля и соответствующего им перечня необходимых входных параметров;

– составление общего алгоритма функционирования модуля.

При формировании отдельных модулей КМ ОЭС, возможно обращение к БД обобщенной модели, а также упрощение выбранного варианта.

4. С целью упрощения модели без потери её адекватности необходимо произвести ранжирование составляющих входного сигнала, создаваемых субъектами фоноцелевой обстановки на входе ОЭС.

5. Предложенный метод аналитической оценки адекватности компьютерных моделей ОЭС в случае отсутствия реально существующего объекта-оригинала (ОЭС), с которым можно было бы сравнивать модель, позволяет оценить область применения этой модели, а в ряде случаев отказаться от дорогостоящего физического (натурного) эксперимента при проектировании и исследованиях сложных ОЭС. На начальных уровнях проектирования критерий адекватности и области адекватности модели целесообразно оценивать по отклонению показателя эффективности работы ОЭС от заданного или требуемого его значения.

6. Особенности компьютерного моделирования двух- и многодиапазонных ОЭС 3-го поколения (МОЭС), а также ОЭС, работающих

активным методом, наиболее часто могут быть учтены путем ввода в базу данных обобщенной структурной схемы КМ ОЭС специальных подразделов, содержащих субмодели, отображающие специфику этих систем, дополнительные показатели эффективности их работы, используемые в них алгоритмы обработки сигналов, параметры и характеристики отдельных СЧ и т.п.

Предложенная в настоящей диссертации методология позволила разработать компьютерные модели ряда ОЭС конкретного назначения, которые показали целесообразные пути совершенствования этих систем и области их эффективного применения. Эти работы были выполнены в рамках НИР «Разработка компьютерной модели для оценки эффективности средств маскировки в оптическом диапазоне спектра» (тема №1-Э/ПР) и «Компьютерная модель тепловизионной системы» (тема №1011-хд), а также контракта (трудового соглашения) с НПО «Комета». Проведенные эксперименты с разработанными на кафедре ОЭП МИИГА и К моделями «КОМОС» и «КМ ОЭС», в частности, при выполнении эти НИР, подтверждают гибкость предложенной методологии и возможность использования ее для решения новых задач моделирования.

Проведенные исследования легли в основу работы по гранту № 2.1.2/4163 Минобрнауки РФ «Методология компьютерного моделирования оптико-электронных систем третьего поколения» в рамках аналитической ведомственной целевой программы “Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010 годы)”, подраздел 2.1.2 «Проведение фундаментальных исследований в области технических наук» (номер государственной регистрации 01200904617).

Использование разработанной методологии позволит с требуемой адекватностью моделировать перспективные ОЭС 3-го поколения, определять показатели качества их работы в различных ситуациях, оценивать эффективность использования элементной базы этих систем, что значительно сократит средства на их разработку.

Основные положения предложенной методологии включены в учебную программу дисциплины «Компьютерное моделирование оптико-электронных систем», используемую при подготовке магистров по направлению «Оптотехника» в МИИГАиК.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ НАУЧНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монография

1. Торшина И.П. Компьютерное моделирование оптико-электронных систем первичной обработки информации –М.: Университетская книга; Логос, 2009. - 248 с.

Статьи в изданиях, вошедших в перечень ВАК РФ

2. Торшина И.П. Формирование баз данных для компьютерной модели оптико-электронной системы // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка.- 2002.- №3.- С.147-153.
3. Торшина И.П. Типы оптических моделей аэрозольной атмосферы для компьютерной модели оптико-электронной системы // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка.-2002.- №3.- С.127-133.
4. Торшина И.П. Структура и состав базы данных по излучению естественных фонов для компьютерной модели оптико-электронной системы // Изв. вузов. Приборостроение.-2002.- №5. - С. 126-140.
5. Торшина И.П. Методика разработки обобщенной компьютерной модели оптико-электронной системы // Изв. вузов. Приборостроение.-2008.- №3. - С. 61-65.
6. Торшина И.П. Компьютерное моделирование многодиапазонных оптико-электронных систем // Изв. вузов. Приборостроение.-2008.- №9.- С. 37-40.
7. Торшина И.П., Якушенков Ю.Г. Оценка адекватности компьютерной модели оптико-электронной системы её заданным свойствам // Изв. вузов. Приборостроение.-2009.- №9.- С. 63-68.
8. Торшина И.П., Якушенков Ю.Г. Структура обобщенной компьютерной модели оптико-электронных систем // Научно-технический вестник С.Пб. ГУ ИТМО.-2009.- №6(64).- С. 5-9.
9. Торшина И.П. Якушенков Ю.Г. Исходные данные для построения компьютерной модели бортовой оптико-электронной системы дистанционного зондирования. // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка.- 2009.- № 5- С. 87-90
10. Торшина И.П., Якушенков Ю.Г. Особенности компьютерного моделирования оптико-электронных систем третьего поколения // Оптический журнал. – 2010. – № 2.- С.87-89.

Другие издания

11. Торшина И.П. Систематизация субмоделей «Атмосфера» для использования в обобщенной компьютерной модели оптико-электронной системы. Депонирована в ОНТИ ЦНИИГА и К, рег. №742-гд, 2001
12. Торшина И.П. Составление баз данных по излучению естественных фонов для обобщенных компьютерных моделей оптико-электронных систем. Депонирована в ОНТИ ЦНИИГА и К, рег. №751-гд, 2002
13. Торшина И.П. Модели аэрозольной атмосферы для проектирования датчиков экологического мониторинга // В сб. материалов XIII Международной конференции «Датчики и преобразователи информационных систем измерения, контроля и управления «Датчик - 2001». – Гурзуф: 2001. – С. 62-63.
14. Торшина И.П. Базы данных статических характеристик анализаторов оптического изображения // В сб. материалов 5-й Международной конференции «Распознавание –2001». Ч.1. – Курск.: 2001. – С. 104.
15. Торшина И.П. Базы данных для компьютерных моделей оптико-электронных систем: некоторые особенности построения и использования // В сб. трудов 5-й международной конференции «Прикладная оптика». Т.3. С.-Пб.: 2002. - С. 66.
16. Торшина И.П. Разработка компьютерной базы данных сложных фонов. // В сб. материалов 6-й Международной конференции «Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации «Распознавание-2003». – Курск.: 2003. – С. 27-28.
17. Мухин С.В., Торшина И.П., Якушенков Ю.Г. Совершенствование обобщенной компьютерной модели оптико-электронной системы «КОМОС». // В сб. трудов. VI Международной конференции «Прикладная оптика» Т.3. «Компьютерные технологии в оптике» - С.-Пб.: 2004.-С. 30-33.
18. Торшина И.П. Алгоритм обработки изображений в компьютерной модели оптико-электронной системы «КОМОС». // В сб. материалов 7-й Международной конференции «Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации «Распознавание-2005». – Курск: 2005. – С. 206-207.
19. Торшина И.П., Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Учебное пособие по дисциплине «Компьютерное моделирование оптико-электронных систем». (Учебное пособие для вузов, рекомендовано УМО в области приборостроения и оптотехники).- М.: МИИГАиК, 2005. - 72 с.
20. Торшина И.П. Формирование компьютерной модели функционирования многодиапазонной оптико-электронной системы // В сб. трудов VII

- Международной конференции «Прикладная оптика-2006» Т.3. «Компьютерные технологии в оптике». - С.-Пб.: 2006.-С.343-349.
21. Караханова С.Ю., Торшина И.П. Ранжирование составляющих сигнала, приходящего на вход многодиапазонной оптико-электронной системы, для её компьютерной модели // В сб. трудов. VII Международной конференции «Прикладная оптика-2006» Т.3. «Компьютерные технологии в оптике». - С.-Пб.: 2006. - С. 349-351.
 22. Волков Н.Н., Мухин С.В., Снегов К.Г., Торшина И.П., Якушенков Ю.Г. Компьютерное моделирование оптико-электронных систем 3-го поколения // Ползуновский альманах. Барнаул- 2007.-№3.-С. 34-35.
 23. Торшина И.П. Формирование сценария работы оптико-электронной системы для её обобщенной компьютерной модели // В сб. «Оптико-электронные системы визуализации и обработки оптических изображений», вып. 2.- М.: ЦНИИ «Циклон», 2007. - С. 142-151
 24. Торшина И.П. Оценка адекватности компьютерной модели оптико-электронных систем // В сб. материалов Международного оптического конгресса «Оптика XXI век». – С.-Пб.: 2008.- С. 71.
 25. Торшина И.П., Якушенков Ю.Г. Компьютерное моделирование на первых этапах проектирования оптико-электронных диагностических систем. // В сб. материалов Международной науч.-техн. конференции «Информационно-измерительные, диагностические и управляющие системы». – Курск: 2009. – С. 90-93.
 26. Торшина И.П. Особенности составления субмодели «Сценарий» при компьютерном моделировании оптико-электронных систем // В сб. материалов III Международного форума «Оптика-2007».- М.: 2007. – С. 49.
 27. Торшина И.П. Адекватность и робастность компьютерных моделей оптико-электронных систем // В сб. материалов V Международного форума «Optics-2009».- М.: 2009. – С. 80.

Авторские свидетельства

28. Максимова Н.Ф., Сагитов К.И., Торшина И.П., Ю.Г. Якушенков. База данных обобщенной компьютерной модели оптико-электронной системы (база данных). Свидетельство об официальной регистрации Роспатента РФ № 2003620073 от 10.04 2003