

Методологические основы внешнего проектирования авиационных комплексов

Жеребин А. М.*, Топоров Б. П., Горлов В. М.****

*Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем,
ул. Викторенко, 7, Москва, 125319, Россия*

**e-mail: zham@gosniias.ru*

***e-mail: bpt@gosniias.ru*

****e-mail: vmgorlov@mail.ru*

Аннотация

Изложены методические основы решения задачи обоснования обликовых характеристик авиационных комплексов (АК), функционирующих в условиях конфликта и неопределённостей.

Показано, что корректное решение задачи формирования облика АК может быть получено только в результате совместной оптимизации состава парка АК (по количеству и номенклатуре) и обликовых параметров АК каждого типа, составляющих этот парк, и строится как двухуровневая итеративная оптимизационная процедура. При этом на первом уровне предусматривается последовательное решение двух оптимизационных задач: задачи синтеза АК при заданном объёме целевых задач, решаемых формируемым парком, и задачи типажа, определяющей состав парка и распределение целевых задач между различными типами АК.

Второй цикл итерационного процесса определяется коррекцией заданного множества целевых задач по полученным на первом уровне результатам оптимизации.

Ключевые слова: внешнее проектирование, синтез, облик, типаж и парк авиационных комплексов, операционное моделирование, декомпозиция

Авиационные комплексы в процессе своего создания последовательно проходят ряд технологически необходимых этапов, существенно различающихся по целям, задачам, объему располагаемой информации и физической природе реализуемых процессов.

Сложившаяся практика проектирования и создания авиационного комплекса (АК) предусматривает последовательное проведение следующих трех основных этапов:

– внешнего (концептуального) проектирования, на котором формируется и обосновывается функционально-технический замысел и концепция комплекса в составе вооруженных сил страны (АК военного назначения) или системы воздушного транспорта (АК гражданского назначения), определяются рациональный облик и типаж создаваемых авиационных комплексов, способы их рационального применения и взаимодействия с системами более высокого иерархического уровня, а также обеспечивающими системами и комплексами. Этап заканчивается разработкой предложений в ТТЗ на выполнение опытно-конструкторских разработок (аванпроекта);

– внутреннего проектирования (конструирования) и изготовления опытного образца АК. Этап заканчивается проведением летно-конструкторских испытаний опытных образцов;

– государственных испытаний, цель которых заключается в том, чтобы оценить соответствие реальных характеристик АК тактико-техническому заданию на него.

Основная особенность внешнего проектирования, отличающая этот этап от других стадий и этапов создания образца авиационной техники, - необходимость содержательного учета факторов, связанных с функционированием внешних по отношению к проектируемому АК систем,

включая положения государственной политики по вопросам применения и развития авиации страны, состав и объем целевых задач и прогнозируемые условия применения авиационных комплексов в предполагаемых конфликтах, возможности и ограничения научно-технического и производственного потенциала авиационной и других отраслей промышленности и ряд других факторов.

Поскольку результаты внешнего проектирования в определенном смысле служат направляющей основой при проведении последующих этапов создания АК, от глубины проработки и обоснованности принимаемых на этом этапе решений во многом зависит успешность всей разработки и эффективность созданного в её результате комплекса.

В процессе внешнего проектирования АК реализуются следующие основные стадии проектирования: определение потребных функциональных свойств комплексов на основе выявления дефицита функциональных свойств существующих и разрабатываемых АК путем анализа их возможностей при решении поставленных целевых задач с учетом прогнозируемых изменений условий применения; формирование технических концепций альтернативных АК; решение задачи синтеза АК в рамках выбранных технических концепций с выделением области неулучшаемых (парето-оптимальных) характеристик[1]; прогноз экономических характеристик комплексов и возможностей их реализуемости; обоснование рационального облика и типажа АК и формирование на этой основе программ создания и развития парка АК с учетом прогнозируемых ресурсных и договорных ограничений.

Задача синтеза состоит в определении рациональных по принятому критерию эффективности значений обликовых параметров АК, т.е. параметров, в наибольшей степени влияющих на его целевую эффективность и стоимость при решении заданного множества целевых задач, возложенных на АК данного типа.

Наиболее эффективно (в смысле целевого эффекта) сможет выполнить каждую конкретную задачу из заданного множества лишь АК, специально синтезированный для решения именно этой задачи. Но число типов АК, образующих парк, т.е. совокупность АК различных типов, способных выполнять задачи, поставленные перед авиацией данного вида или данного целевого назначения, должно быть существенно ограниченным с учётом стоимостных, ресурсных и кадровых ограничений при осуществлении процессов производства и эксплуатации АК, что определяет необходимость решения еще одной проблемы - задачи типажа АК.

Задача типажа АК заключается в определении рационального по принятому критерию эффективности качественного и количественного состава парка АК при условии, что этот парк способен выполнить всю совокупность поставленных задач перед авиацией данного вида (целевого назначения). При этом качественный состав парка (другими словами, номенклатура входящих в парк типов АК) является прямым следствием его рационального количественного состава, получаемого в результате определения численности АК различных типов, потребной для выполнения всего множества целевых задач S при их рациональном распределении между составляющими парк типами АК.

Структура модели синтеза АК k -го типа определяется следующими факторами:

- целевой задачей или совокупностью целевых задач АК S_k ;
- множеством допустимых значений обличковых характеристик АК X_{ak} ;
- множеством допустимых значений обличковых характеристик средств, противодействующих АК или (и) являющихся его объектами воздействия Y_{ak} ;
- множеством допустимых способов действий (стратегий) АК X_{ck} ;

- множеством допустимых способов действий противника Y_{ck} ;
- множеством условий выполнения АК целевых задач Z_k ;
- относительной желательностью для оперирующей стороны того или иного результата операции (выполнения целевых задач).

Последнее обстоятельство раскрывается в модели путем введения критерия оптимальности W . Когда такой критерий введен, задача гарантированного синтеза АК k -го типа сводится к нахождению такого вектора его обликочных параметров x_{ak}^0 , что

$$\bar{W}_{S_k}(x_{ak}^0) = \int \dots \int_{(z_{1k})} \inf_{\substack{x_{ak} \in X_{ak} \\ x_{ck} \in X_{ck}}} \sup_{\substack{y_{ak} \in Y_{ak} \\ y_{ck} \in Y_{ck} \\ z_{2k} \in Z_{2k}}} W_{S_k}(x_{ak}, y_{ak}, x_{ck}, y_{ck}, z_{1k}, z_{2k}) dF(z_{1k}),$$

если оперирующая сторона может получить и использовать при выборе x_{ak} информацию о реализации z_1 . В противном случае

$$\bar{W}_{S_k}(x_{ak}^0) = \inf_{\substack{x_{ak} \in X_{ak} \\ x_{ck} \in X_{ck}}} \sup_{\substack{y_{ak} \in Y_{ak} \\ y_{ck} \in Y_{ck} \\ z_{2k} \in Z_{2k}}} \int \dots \int_{(z_{1k})} W_{S_k}(x_{ak}, y_{ak}, x_{ck}, y_{ck}, z_{1k}, z_{2k}) dF(z_{1k}),$$

где:

z_{1k} - вектор, включающий компоненты вектора z_k , для которых известна функция распределения F ;

z_{2k} - вектор, включающий компоненты вектора z_k , о которых известно только, что $z_{2k} \in Z_{2k}$;

S_k - совокупность боевых задач, решаемых АК k -го типа;

$\bar{W}_{S_k}(x_{ak}^0)$ - математическое ожидание значения критерия W_{S_k} , в качестве которого принят показатель потребных затрат на парк АК данного типа, необходимый для выполнения задач S_k .

Решение задачи синтеза АК в такой постановке могло бы считаться вполне удовлетворительным, если бы при записи содержательного

выражения критерия оптимальности удалось с достаточной полнотой отразить многообразие связей проектируемого АК с системой более высокого уровня иерархии, т.е. с надсистемой (в роли последней может выступать парк АК данного целевого назначения). Речь идет именно о многообразии связей, а не только о критерии оптимальности. В самом деле, уже достаточно поверхностный логический анализ показывает, что множество целевых задач S_k (а следовательно, и тесно взаимосвязанные с ним множества $X_{ak}, Y_{ak}, X_{ck}, Y_{ck}$ и Z_k) для k -го типа АК определяется на более высоких уровнях иерархии, где осуществляется разбиение множества задач S , выполняемых формируемым парком АК данного вида, на подмножества S_k , т.е. определяются области рационального применения для каждого из K типов АК, входящих в состав парка. Поэтому целесообразной становится такая постановка задачи синтеза АК, в которой рациональным образом выбираются не только компоненты вектора x_{ak} , но и другие элементы множества факторов, определяющих структуру модели синтеза, и, в частности, разбиение множества S на подмножества S_k , $S = \bigcup_{k=1}^K S_k$, где K - общее число типов АК в составе парка. Формальная запись такой задачи (которую естественно назвать задачей "синтез - типаж", поскольку ее решение содержит характеристики рационального облика не одного типа АК, а всех типов, образующих парк, т.е. определяет его типаж) может быть представлена в следующем виде

$$\bar{W}_s(x_a^0, K^0) = \int \dots \int_{(z_1)} \inf_{\substack{x_a \in X_a \\ x_c \in X_c}} \sup_{\substack{y_a \in Y_a \\ y_c \in Y_c \\ z_2 \in Z_2}} W_s(x_a, y_a, x_c, y_c, z_1, z_2) dF(z_1),$$

где под x_a^0 понимается матрица, составленная из вектор - столбцов x_{ak}^0 , каждый из которых описывает рациональный облик АК k -го типа. При этом число столбцов K в матрице x_a также является управлением.

Структурная схема алгоритма оптимального синтеза в такой постановке приведена на рис. 1.

Алгоритм содержит два итерационных цикла. Первый (внутренний) цикл представляет собой процесс последовательного решения задачи оптимизации обликовых параметров каждого из K типов АК при изменении распределения задач S между ними. На выходе цикла получаем оптимальные характеристики парка АК (x_a^0, K^0) , соответствующее оптимальное распределение целевых задач между типами АК, составляющими этот оптимальный парк $\{S_k^0\}$, оптимальное значение критерия $\bar{W}_S(x_a^0, K^0)$ для заданной совокупности целевых задач S парка АК в целом. Внешний итерационный цикл образуется процессом коррекции множества S по полученным результатам оптимизации.

В приведенных выражениях критерия оптимальности опущены обозначения зависимости всех входящих в них величин от времени, которая в общем случае всегда имеет место. При этом следует различить два вида времени: макровремя t , используемое для описания процесса "жизни" комплекса в обычный период и измеряемое годами и десятилетиями, и микровремя τ , в котором рассматриваются процессы течения боевой операции.

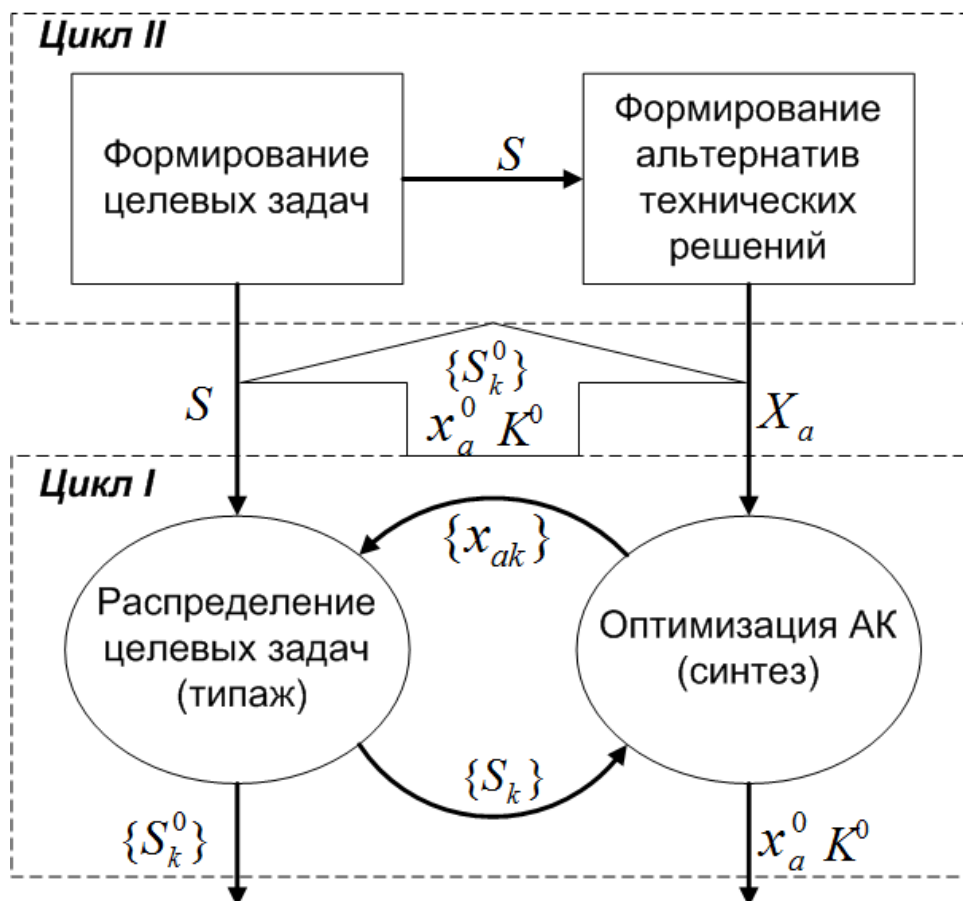


Рис. 1

Поскольку зависимость показателей эффективности от времени проведения операции τ всегда учитывается, будем различать две возможные постановки задачи "синтез - типаж" по степени учета макровремени t : статическую (если в выражениях критерия оптимальности не учитываются зависимости входящих в них величин от времени t) и динамическую (в противном случае).

В силу специфики статической модели в ней не удаётся учесть ряд важных особенностей процесса внешнего проектирования АК. Среди них, в первую очередь, можно назвать следующие:

- формирование рационального парка АК происходит в условиях наличия сложившегося на протяжении ряда лет и уже частично технически или морально устаревшего парка АК;

- АК, рекомендованные для включения в рациональный парк, могут в той или иной степени опираться на аван- и эскизные проекты уже проработанные

промышленностью, или же содержать принципиально новые черты; другими словами, "степень продвинутости", а, следовательно, и возможные сроки поступления в производство и эксплуатацию АК, анализируемых при решении задачи типажа, являются различными;

- можно представить себе ситуацию, когда окажется целесообразным (по принятому критерию оптимальности) производить только весьма сложные и дорогостоящие АК, но возможности промышленности не позволят обеспечить потребных темпов их производства; недопустимо также и проявление другой крайности - формирование парка только из АК простейших (дешевых) типов в количествах, далеко превосходящих возможности обеспечения их эксплуатации;

- существенное влияние на рациональный состав парка могут оказать также динамика стоимости серийного производства АК в зависимости от размера серии и темпов выпуска, изменение во времени целевых задач и условий их выполнения, обусловленное соответствующим изменением возможностей противной стороны, и ряд других обстоятельств.

Переход к динамической постановке задачи "синтез - типаж", помимо чисто формального введения явной зависимости от времени t всех величин и множеств, входящих в выражение критерия оптимальности, что в математическом плане означает переход от задачи многопараметрической оптимизации к неклассической вариационной задаче, требует уточнения момента времени, к которому должен быть создан оптимальный парк. Если бы можно было с достаточной степенью уверенности указать предполагаемый момент t_n начала применения формируемого парка, то естественно было бы добиваться экстремума величины $W[t_n, x_a(t)]$, $t \in [t_0, t_n]$, где t_0 - момент начала реформирования парка АК. Но t_n есть величина неопределенная, причем эта неопределенность имеет стратегический характер, обусловленный сознательной деятельностью участвующих в конфликте сторон, в связи с этим

естественной представляется попытка раскрыть неопределенность с привлечением принципа гарантированного результата. Однако его прямое применение в виде нахождения $\inf_{\substack{x_a(t) \\ t \in [t_0, t_n]}} \sup_{t_n \in [t_0, t_{max}]} W[t_n, x_a(t)]$, где $[t_0, t_{max}]$ - период планирования, приведет, очевидно, к тривиальному выводу $t_n = t_0$ то есть к формированию парка по принципу "если завтра война". Для разрешения этой ситуации предлагается применение компромиссного методического подхода, который можно назвать принципом последовательного краткосрочного планирования. При использовании этого принципа период $[t_0, t_{max}]$ разбивается на n (в общем случае неравных) интервалов Δt_i и решается последовательность задач нахождения экстремума величины $W[t_{i-1} + \Delta t_i, x_a(t)]$, $t \in \Delta t_i$, при этом результаты решения $(i-1)$ -й задачи служат исходными данными для i -й задачи. В частности, на первом шаге матрица $x_a(t_0)$ описывает существующий парк АК. В такой постановке задача рационального планирования развития парка АК приобретает весьма высокую степень общности. Так, при $\Delta t \rightarrow 0$ приходим к гарантированному результату, а при $\Delta t \rightarrow t_{max} - t_0$ к $W[t_n, x_a(t)]$ с $t_n = t_{max}$.

Вопрос выбора рациональной величины шага разбиения планового периода Δt является достаточно сложным и должен решаться, исходя из следующих соображений. Сравнительно малый шаг разбиения обеспечивает высокий уровень готовности парка в каждый момент времени, но может привести к недальновидной политике распределения ресурсов и, как следствие этого, к существенным потерям в значении критерия оптимальности в случае, если t_n достаточно велико. Выбор сравнительно большого шага разбиения уменьшает эти потери, но может привести к существенным потерям в значении критерия оптимальности, если конфликт начнётся ранее намеченного срока.

Методы обоснования рационального типажа, используемые в процессе внешнего проектирования АК, построены на основе комбинации методов решения следующих типовых задач.

Задача А. Задан суммарный объем целевых задач S , который должен быть решен формируемым парком АК. Задан набор альтернативных вариантов АК, причем обликотые характеристики этих АК известны. Необходимо определить рациональный состав парка АК, обеспечивающий выполнение заданного объема целевых задач при минимальных суммарных затратах на разработку, серийное производство и эксплуатацию всех входящих в парк комплексов в течение принятого интервала планирования.

Задача В. Отличие этой задачи от задачи А, где все АК считаются вновь разрабатываемыми, состоит в предположении, что к моменту формирования рационального парка на эксплуатации имеется набор АК существующих типов, производство которых уже прекращено или еще продолжается. В соответствии с этим при вычислении критериальной функции (суммарных затрат) для этих АК учитываются только затраты на эксплуатацию и серийное производство (если оно продолжается).

Задача С. Представляет собой динамический (в мирном времени) вариант задачи В. По результатам решения этой задачи формируется программа создания и развития парка АК.

Как следует из приведенных формулировок решаемых задач, задача А есть модельный аналог проблемы формирования рационального парка из вновь создаваемых АК; задача В - модельный аналог проблемы формирования смешанного рационального парка из вновь создаваемых иуже состоящих на эксплуатации АК (замены имеющихся АК новыми) в статическом варианте, а задача С –задача формирования рационального парка АК в течение планируемого периода времени.

Казалось бы, практическое значение имеет только решение задач В и С, по своей постановке более приближенных к реальности. Однако на деле может

иметь место ситуация, когда использование уже имеющихся на вооружении АК в рациональном парке является обязательным. Тогда для этих АК легко может быть выделена соответствующая доля целевых задач, после чего задача В сведется к задаче А.

Технологически процесс внешнего проектирования АК реализуется путем соотнесения между собой результатов следующих взаимоувязанных процессов: генерации конкурирующих вариантов облика АК, оценки потребных затрат на жизненный цикл этих вариантов и оценки их целевой эффективности. В этих целях создается специальный инструментарий в виде многоуровневой системы внешнего проектирования, включающей блоки моделей авиационного комплекса, моделей потребных затрат и моделей выполняемых операций (операционных моделей). Структура такой системы (применительно к АК ударной авиации) представлена на рис. 2.

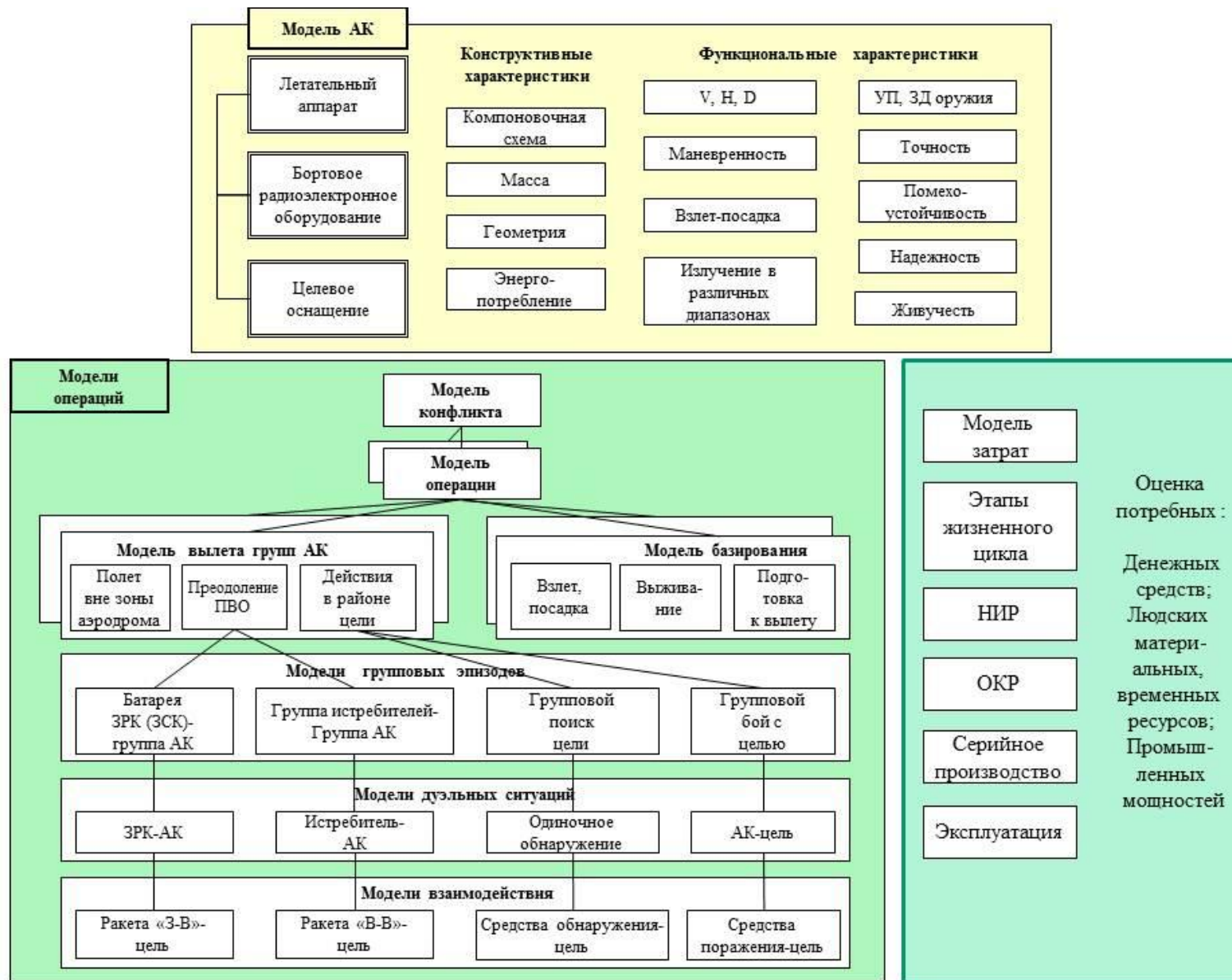


Рис. 2.

Операционное моделирование в изложенной выше общей технологической схеме внешнего проектирования АК реализует процесс сравнительной оценки целевой эффективности альтернативных вариантов облика АК. В результате такой оценки формируются количественные обоснования для принятия решений по выбору конкретного варианта состава и характеристик всех основных бортовых систем, в совокупности образующих авиационный комплекс[2].

На рис. 2 система операционных моделей развернута по уровням операционной иерархии. На высших уровнях находится модель операции, для достижения целей которой создается проектируемый АК и модель конфликта в целом, фрагментами которого являются операции с участием авиационных комплексов. С помощью этих моделей обосновываются общий состав и объем целевых задач, выполняемых формируемым парком авиационных комплексов, а также распределение этого объема между различными типами АК, образующих парк. Получаемые при этом результаты являются определяющей исходной информацией для выбора в соответствии с принятой методологией внешнего проектирования обличевых характеристик проектируемого комплекса. Поскольку вполне очевидно, что обоснованное назначение общего объема задач и его распределение между АК различных типов невозможно без учета конкретных возможностей и характеристик АК, было бы некорректным ориентироваться при синтезе облика АК на возможность директивного назначения состава и объема решаемых им задач. Именно это обстоятельство определяет необходимость включения рассматриваемых моделей верхнего уровня в общую систему операционного моделирования. Кроме того, только на этих уровнях моделирования можно удовлетворительным образом оценить достаточность целевых возможностей АК с выбранными в результате проектирования составом и характеристиками бортовых систем. Нижний иерархический уровень моделирования ограничен моделями, описывающими процессы взаимодействия отдельных составляющих комплекса с внешней средой.

Используемая в процессе внешнего проектирования АК операционная декомпозиция моделей выполняет важную методическую функцию.

Общая задача внешнего проектирования АК относится в математическом плане к классу неклассических вариационных задач высокой размерности. В настоящее время достаточно корректных общих методов решения таких задач не существует, что вынуждает применять приемы, использующие идею декомпозиции проектируемой системы последующей субоптимизацией составляющих ее подсистем. Декомпозиционный подход может дать необходимый эффект только в том случае, если позволит в достаточной для разрешимости задачи степени свести многомерную общую задачу синтеза АК к совокупности частных задач меньшей размерности. Этого удастся добиться путем согласованного использования в процессе проектирования АК наряду с его структурной декомпозицией также и декомпозиции операционной с целью выбора характеристик подсистем комплекса на возможно более низких

уровнях его операционной иерархии, используя при этом модель того этапа операции, на эффективность которого данная подсистема оказывает основное влияние.

Для исключения возможного при этом снижения общей эффективности комплекса за счет ухудшения его целевых возможностей на других этапах операции, методология внешнего проектирования АК включает так называемый метод подсистемной (локальной) оптимизации, позволяющий осуществлять такой выбор. Идею этого метода можно формально представить следующим образом.

Пусть существует множество $J^{(A)}$ вариантов некоторой подсистемы A , характеризуемых некоторым множеством характеристик $\{x_i^j\} = I$. Определим для каждого j -го варианта этой подсистемы ($j \in J^{(A)}$) множество $K_j^{(A)}$, такое, что для любого $k \in K_j^{(A)}$ выполняются условия $x_i^{(k)} \geq x_i^{(j)}$, $x_l^{(k)} > x_l^{(j)}$, $l \neq i$, $i \in I$.

Множество $J_0^{(A)} \subset J^{(A)}$ назовём доминирующим множеством вариантов подсистемы A , если $K_j^{(A)} \neq \emptyset$, $j \in J_0^{(A)}$.

Таким образом, процесс подсистемной оптимизации сводится к процессу определения доминирующего множества вариантов для каждой подсистемы, и хотя в общем случае при этом нельзя выбрать какой-то один оптимальный вариант, значительную часть допустимых вариантов удаётся исключить из дальнейшего рассмотрения и, таким образом, значительно сузить множество вариантов, передаваемых для рассмотрения на более общих, верхних уровнях структурной иерархии, требующих привлечения более сложных операционных моделей.

Кроме представленной на рис. 2 операционной иерархии, в практике модельного обеспечения внешнего проектирования всегда создается еще одна иерархическая структура, включающая три типа операционных моделей, отличающихся уровнем методической сложности и соответствующим уровнем обобщения (агрегирования) параметров моделирования. На верхнем уровне, использующем наиболее сложные в математическом отношении методы, находятся игровые модели операций. Следующий уровень представляют оптимизационные модели, на нижнем иерархическом уровне находятся имитационные математические модели операций, использующие сравнительно простые формальные построения, но

зато отличающиеся максимально подробным учетом характеристик АК и факторов, присущих реальной операции.

Сочетание имитационного, оптимизационного и игрового моделирования является одним из основных принципов построения системы операционных моделей внешнего проектирования АК. На игровом уровне обосновываются тактические решения (т.е. способы применения АК), для выбора которых необходимо содержательно учитывать противодействие разумного противника. На оптимизационном уровне, в основном, выбираются рациональные технические решения, на имитационном уровне осуществляется детальная оценка целевой эффективности АК при реализации выбранных на предыдущих уровнях решений.

Одной из центральных идей применения в процессах внешнего проектирования методов операционного моделирования является идея сокращения размерности решаемых оптимизационных задач, особенно актуальная при использовании моделей высших уровней операционной и модельной иерархии, путем использования метода обратимой инвариантной эталонизации [3], применен метод, позволяющий осуществить пересчет численности разнотипных средств в эквивалентную им в том или ином смысле численность однотипных средств того же назначения, выбранных в качестве условной единицы измерения (эталона). Метод обратимой инвариантной эталонизации, позволяет исключить коренной недостаток существующих методов эталонизации, обычно используемых при оптимизации сложных систем, связанный с невозможностью однозначно осуществить обратный переход к естественным фазовым координатам процессов.

Идейная основа метода состоит в придании процессу эталонизации некоторых априорно желаемых свойств (в частности, свойств инвариантности по отношению к этому процессу определяющих характеристик эталонизируемых параметров, таких, как полезность, численность, эффективность) и обеспечения обратимости эталонизации на суженном за счет указанных свойств множестве их определения.

Технологическая схема применения метода обратимой инвариантной эталонизации приведена на рис.3 на примере его реализации при моделировании

многостороннего конфликта с участием разнородных сил. Представленная схема включает несколько итерационных циклов с проверкой выполнения условий на их сходимость. На выходе работы операционной модели конфликта получаем конечные численности (в реальных единицах) активных (поражающих) и ценностных объектов участвующих сторон, оптимальные тактические решения (оптимальные целераспределения)[4], оценку критериев эффективности действий сторон в конфликте.

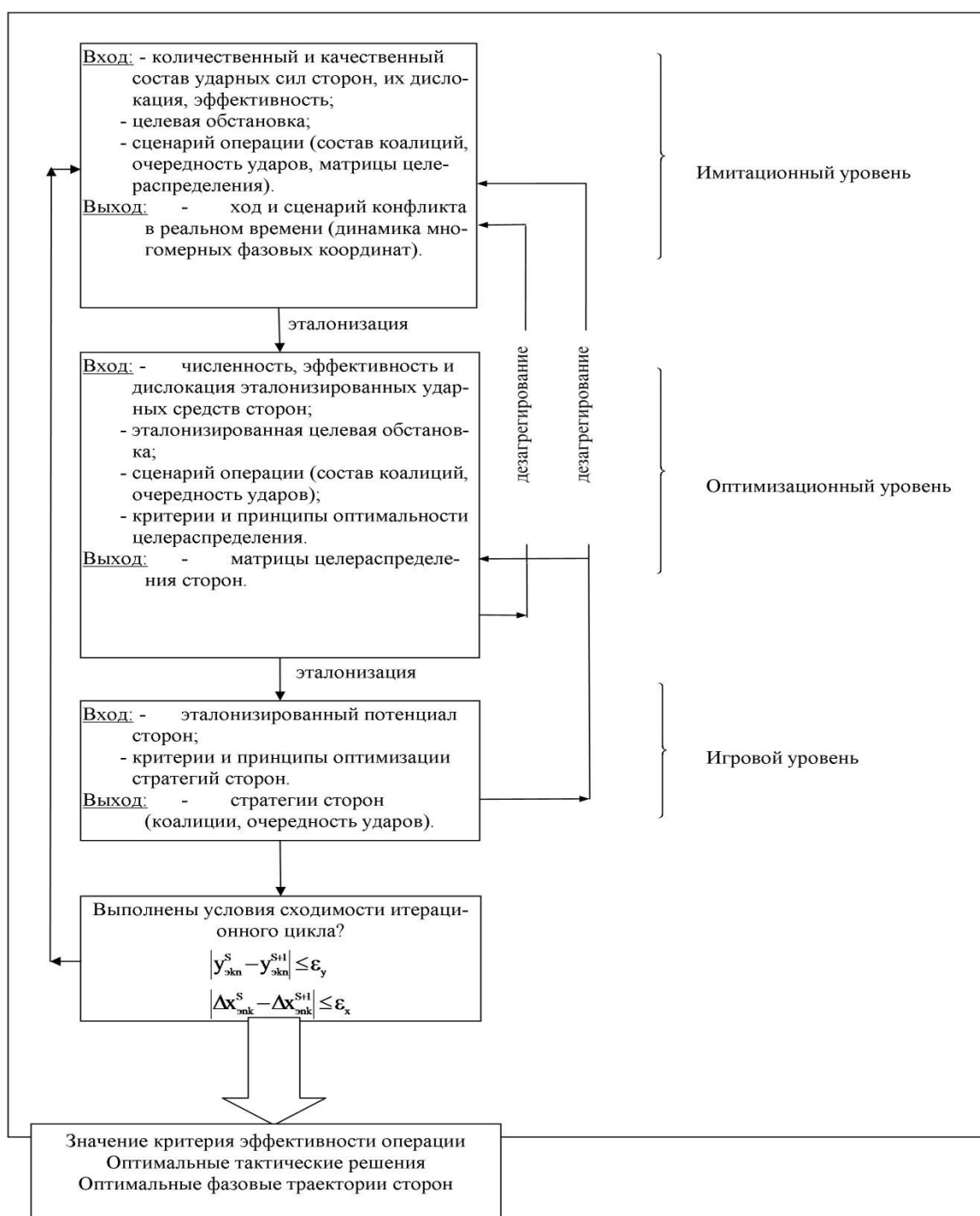


Рис. 3

Заключение

Изложенные в статье методологические подходы и методы решения задач синтеза и типажа АК позволяет обосновать рациональные обликовые характеристики АК перспективных типов, что составляет, по-существу, необходимую исходную информацию для начала их опытно-

конструкторской проработки, отражаемую в ТТЗ на аванпроекты АК. Кроме того, разработанные методы позволяют в короткий срок разработать варианты рациональных парков АК при различных значениях исходных данных, точный прогноз которых на планируемый период времени либо дает лишь интервальную оценку, либо невозможен в принципе. Разработка таких вариантов рациональных парков доставляет необходимый исходный материал для перспективного планирования создания и производства АК.

Библиографический список

1. Гермейер Ю.Б. Введение в теорию исследования операций.// Москва, Наука, 1971.-384 с.
2. Жеребин А.М., Топоров Б.П., Горлов В.М. Методы моделирования в задачах анализа и управления при проектировании авиационных комплексов//Труды III Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Самара, 2001, 206-219 с.
3. Горлов В.М., Топоров Б.П. Итеративная обратимая инвариантная эталонизация в многомерных динамических системах //Труды II-ой Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Самара, 2000, 222-243 с.
4. Загребяев А.М., Крицына Н.А., Кулябичев Ю.П., Шумилов Ю.Ю. Методы математического программирования в задачах оптимизации сложных технических систем// Москва, МИФИ 2007.-232 с.