Формализация системы критериев планирования по стадиям жизненного цикла создания инноваций

Хмелевой В.В., доцент, кафедра 505 «экономика инноваций и управление проектами», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия **Гязова М.М.,** доцент, кафедра 505 «экономика инноваций и управление проектами», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

Аннотация. В статье, на основе комплексной имитационной модели создания инноваций по стадиям жизненного цикла изделий, формализуется система критериев и критериальных функций оптимизации укрупненного плана реализации инновационной программы предприятия. Предложенная система критериальных функций, благодаря декомпозиции исходного множества изделий программы на подмножества, на которых определены отдельные критерии, позволяет упростить процедуры многокритериальной оптимизации плана и адаптировать их к текущим ситуациям, которые складываются в процессе моделирования программы. Обоснованная схема доминирования определяет логику селекции критериев на каждом интервале планирования инновационной программы. Рассмотрены условия, при которых каждому критерию и его критериальной функции ставится в соответствие подмножество изделий их определения.

Ключевые слова: система критериев оптимизации; инновационная программа; комплексная имитационная модель; стадии жизненного цикла создания инноваций; критериальная функция оптимизации; доминирование критериев.

Formalization of criteria for planning life-cycle stages of innovation

Khmelevoy V.V., department 505 «economics of innovation and project management», Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia **Gyazova M.M.,** department 505 «economics of innovation and project management», Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

Annotation. The article on the basis of complex simulation models of innovation in life-cycle stages of the product design can be formalized in the system of criteria and criterial optimization consolidated plan of implementing the innovative program of the enterprise. The proposed system of criteria-based functions, due to the decomposition of the original many products of the program into subsets, which are defined criteria allows to simplify the procedure of multicriteria optimization of the plan and to adapt them to current conditions in the simulation program. A reasonable scheme of domination defines the logic of selection criteria in each interval of planning innovative programs. The conditions under which each criterion and the criterion function corresponds to a subset of products to identify them.

Keywords: the system of criteria of optimization; innovative program; the integrated simulation model; stages of the life cycle of innovation; the criterion function of optimization; dominance criteria.

Современная машиностроительная отрасль характеризуется высокими темпами научно-технического развития, новизной разрабатываемых производимых изделий, быстрым изменением технологий и моделей изделий с высоким уровнем интеграции в мировую экономику. При этом наблюдается широкая преемственность моделей с применением быстро перестраиваемых технологий, что сказывается на сокращении сроков создания новой техники по Высокий жизненного шикла. уровень конкуренции всем стадиям современном рынке наукоемкой продукции требует уже ранних, получение прогнозной предпроектных стадиях создания продукции

информации, относительно реализуемости программы инновационного развития предприятия. В этой связи возникают две проблемы. Первая из них это получение достаточно надежных исходных данных, адекватных задачам прогнозирования и планирования реализации инновационной программы предприятия. Эти данные должны содержать укрупненные характеристики изделий в начале каждой стадии жизненного цикла, отражающих конструкцию, технологию и затраты на создание изделия в укрупненном виде. Такие данные могут быть получены путем сопоставления проектируемого изделия с существующими аналогами с соответствующей экспертной корректировкой, а также из предпроектных научно-исследовательских работ. Вторая проблема это разработка комплексной имитационной модели инновационного процесса по стадиям жизненного цикла изделия, которая включает модель изделия, модель производственных ресурсов и систему критериев оптимизации, с помощью которых осуществляется движение изделий по времени на оси научно-производственной деятельности предприятия. С помощью такой имитационной модели формируется не только план разработок и производства новых изделий, но и дается оценка реализуемости инновационной программы предприятия. При этом в программу включаются не только вновь создаваемые изделия, но и уже освоенные в производстве изделия. В качестве инструмента моделирования изделий используется ленточная модель изделия типа графика Ганта, которая перемещается во времени в зависимости от соотношения трудоемкости изделий программы и имеющихся пропускных способностей, производственных мощностей предприятия. В процессе движения изделий сопоставляется директивный и расчетный срок создания изделия в виде отклонения расчетного срока от директивного, обозначенного в данной статье как «резерв». Модель имеет универсальный характер применительно к стадиям жизненного цикла создания изделия. Ее варианты на различных стадиях от НИР производства отличаются количеством изделий, ДО проектов, рассматриваемых набором одновременно видами ресурсов, критериев оптимизации и способом оценки экономической эффективности. Центральной

частью комплексной модели планирования является система критериев статье, оптимизации, рассмотренная В данной которая несколько видоизменяется за счет ввода новых критериев и построенная на основе расширенной системы критериев, критериальных функций оптимизации с обоснованием их доминирования. В таблицах 1,2 показаны состав системы критериев, где $\delta_i(t)$ – резерв i - го изделия на t -м интервале моделирования (ИМ), а $\delta_i(t+1)$ – резерв на (t+1)-м ИМ. Критерии делятся на три группы: (из которых выделяются номенклатурные), временные ресурсные финансовые. Эти критерии по совокупности соответствуют тем требованиям, которые были сформулированы выше. При этом некоторые из них могут использоваться в качестве оптимизационных, другие в качестве ограничений. Представим вначале в формализованном виде временные и номенклатурные критерии и их критериальные функции оптимизации, при этом допустим, что все критериальные функции приведены как минимизация их значений. Критерий F_1 : количество изделий с положительным резервом времени в текущем ИМ – $\delta_i(t)$ >0 и с отрицательным в следующем – $\delta_i(t+1)$ <0. Это означает, что при перемещении модели изделия на один ИМ, директивный срок сорван. Данная ситуация описывается следующим $(\delta_i(t)>0 \land \delta_i(t+1)<0)$. Формально критерий F_1 выглядит следующим образом:

$$F_{1} = \sum_{i=1}^{N_{t}} -\frac{\max\left[0, -\delta_{i}(t+1)\right]}{\delta_{i}(t+1)},$$

а его критериальная функция оптимизации:

$$f_{1} = \min \left(\sum_{i=1}^{N_{t}} -\frac{\max \left[0, -\delta_{i}(t+1)\right]}{\delta_{i}(t+1)} \right),$$

где
$$\delta_i(t+1) = T_{g_i} - T_{o_i}$$
;

 N_t – количество изделий, рассматриваемых на (t) -м ИМ;

 T_{g_i} , T_{o_i} — соответственно директивный и расчетный сроки окончания создания изделий.

Таблица 1 **Временные и номенклатурные критерии оптимизации плана**

Критерии	Описание критерия	Способ оптимизации		
F_1	количество изделий с положительным резервом в текущем и отрицательным в следующем ИМ: $\delta\left(t\right) \geq 0 \wedge \delta\left(t+1\right) \leq 0$	минимизация количества заказов/изделий		
F_2	количество изделий с отрицательным резервом в текущем ИМ: $\delta\left(t\right)\leq 0 \to \delta\left(t+1\right)\leq 0$	минимизация количества заказов/излепий		
F_3	сумма отрицательных резервов $\left[\left(\delta\left(t\right)\geq0\wedge\delta\left(t+1\right)\leq0\right)\wedge\left(\delta\left(t\right)\leq0\wedge\delta\left(t+1\right)\leq0\right)\right]$	минимизация суммы		
F_4	отрицательные резервы изделий $\left[\left(\delta\left(t\right)\geq0\wedge\delta\left(t+1\right)\leq0\right)\wedge\left(\delta\left(t\right)\leq0\wedge\delta\left(t+1\right)\leq0\right)\right]$	минимизация максимально отрицательного резерва		
F_5	количество изделий не выполненных в плановом периоде (с незавершенным производством) $\left(T_o - T_n \geq 0\right)$	минимизация количества заказов/изделий		
F_6	изделия с положительным резервом в текущем ИМ и с положительным резервом в следующем ИМ $\delta \ \big(\ t \ \big) \geq \ 0 \ \land \ \delta \ \big(\ t + 1 \ \big) \geq \ 0$	по приоритетам		
F_7	изделия с нулевым резервом в текущем периоде $\delta \ (t \) \geq \ 0 \ \wedge \ \delta \ (t+1 \) = \ 0$	по приоритетам		

Таблица 2 **Ресурсные и финансовые критерии**

Критерии	Описание критерия	Способ оптимизации		
F_8	суммарная недозагруженность ресурсов	минимизация суммарной недозагруженности		
F_9	недозагруженность по видам ресурсов	минимизация минимально недозагруженного ресурса		
F_{10}	недозагруженность наиболее важного ресурса	минимизация недозагруженности		
F_{11}	суммарный финансовый ущерб от изделий с отрицательным резервом	минимизация суммарного финансового ущерба		
F_{12}	максимальный ущерб от изделия с отрицательным резервом	минимизация максимального ущерба		

Критерий F_2 , где количество изделий с отрицательным резервом в текущем ИМ $\delta_i(t)$ и в следующем $\delta_i(t+1)$, при условии $\left(\delta_i(t) \le 0 \land \delta_i(t+1) \le 0\right)$, и его критериальная функция оптимизации описываются следующим образом:

$$F_{2} = \sum_{i=1}^{N_{t}} \frac{\max\left[0, -\delta_{i}(t+1)\right]}{\delta_{i}(t+1)} * \frac{\max\left[0, -\delta(t)\right]}{\delta_{i}(t)};$$

$$f_{2} = \min \left[\underbrace{\sum \frac{\max \left(0, -\delta(t+1)\right)}{\delta_{i}(t+1)}}_{f_{2.1}} * \underbrace{\frac{\max \left[0, -\delta_{i}(t)\right]}{\delta_{i}(t)}}_{f_{2.2}} \right]$$

При определении критериальной функции для различных комбинаций значений резервов видно, что только одна комбинация соответствует критериальной функции f_2 .

Критерии	Условия вычисления f_2									
	$\delta_i(t) \le 0 \wedge \delta_i(t+1) \le 0$	$\delta_i(t) \ge 0 \wedge \delta_i(t+1) \ge 0$								
f_1	1	1	0							
f_2	1	0	0							
$f_1 \cdot f_2$	1	0	0							

Критерий $F_3 = \sum_{i=1}^{N_t} \max_i \left[0, -\delta_i \left(t+1\right)\right]$ определяется как сумма отрицательных резервов, которая образуется из критериев F_1 и F_2 , и его критериальная функция оптимизации описывается следующим образом:

$$f_3 = \min \sum_{i=1}^{N_t} \max_{i} \left[0, -\delta_i (t+1) \right].$$

Критерий F_4 используется для минимизации наибольшего отрицательного резерва среди всех изделий на t-м ИМ, независимо от того, какой был знак резерва:

$$\left[\left(\delta_{i}(t) \geq 0 \wedge \delta_{i}(t+1) \leq 0\right) \wedge \left(\delta_{i}(t) \leq 0\right) \wedge \delta_{i}(t+1) \leq 0\right],$$

где критерий и его критериальная функция оптимизации описываются следующим образом: $F_4 = \max_i \left(-\delta_i \left(t + 1 \right) \right);$ $f_4 = \min\max_i \left(-\delta_i \left(t + 1 \right) \right).$ Критерий F_5 позволяет минимизировать количество изделий, расчетные сроки создания которых завершаются после окончания планового периода, независимо от того, как складывалось отношение директивного и расчетного срока изготовления изделий программы. В процессе моделирования это количество изделий представляют собой незавершенное производство на конец планового периода. Данную ситуацию представим следующим образом: $T_{oi} \geq T_{nn}$, где T_{oi} — расчетный прогнозируемый срок окончания создания i -го изделия, T_{nn} — окончание планового периода программы. Критерий и его критериальная функция имеют следующий вид: $F_5 = \sum_{i=1}^N \frac{\max\left(0, T_{oi} - T_{nn}\right)}{T_{oi} - T_{nn}};$

 $f_5 = \min \sum_{i=1}^N \frac{u_3 \partial_i F_5}{u_3 \partial_i F_5}$, где N – количество изделий, включенных в программу.

Критерий $F_{\rm 6}$ характеризует изделия , которые имеют положительный резерв в текущем и не меняют в следующем ИМ: $\delta_i(t) \ge 0 \land \delta_i(t+1) \ge 0$. Эти изделия включаются в план по высокому приоритету, так как не увеличивают количество нарушивших директивный Критерий изделий, срок. F_7 характеризует изделия с нулевым резервом и включается в план на ИМ в очередь. заканчивается их директивный первую так срок: как $\delta\left(t\right) \geq 0 \wedge \delta\left(t+1\right) = 0$. Из приведенных критериев и соответствующих им критериальных функций оптимизации, критерии F_2 и F_3 являются временными, остальные — номенклатурными, но при условии, что при их определении учитывается соотношение директивных и расчетных сроков изготовления изделий. Критерий F_8 показывает суммарную недогруженность всех ресурсов предприятия на текущем ИМ. Задача оптимизации по данному критерию состоит в минимизации отклонения потребных ресурсов на разработку и изготовление изделий от выделенных — пропускных способностей, производственных мощностей предприятия. Критерий описывается следующим

образом:
$$F_8 = \sum_{j=1}^{m_t} \left(W_j\left(t\right) - V_j\left(t\right)\right), \qquad \text{где} \qquad W_j\left(t\right) = \sum_{j=1}^{m_t} W_j\left(t\right);$$

 $V_j(t) = \sum_{j=1}^{m_t} \sum_{i=1}^{n_t} V_{ij}(t) \cdot L_i(t)$, где $W_j(t)$ — объем j-го выделенного ресурса в t-м ИМ, при условии $j=1,m_t$, где m_t — количество видов ресурсов. $V_{ij}(t)$ — потребный j-й ресурс в t-м ИМ для i-го изделия. $L_i(t)$ — количество изделий i-го типа в t-м ИМ.

Применение критерия F_9 приводит к минимизации максимально недогруженного вида ресурса и рассчитывается следующим образом: $F_9 = \max\left(W_j(t) - V_j(t)\right); \quad f_9 = \min\max\left(W_j(t) - V_j(t)\right).$ По критерию F_{10} минимизируется недогрузка наиболее важного вида ресурсов. Критерий и его критериальная функция имеют соответственно следующий вид: $F_{10} = \max_j\left(W_j^b(t) - V_j^b(t)\right); \quad f_{10} = \min\max_j\left(W_j^b(t) - V_j^b(t)\right).$ Критерии F_8 , F_9 , F_{10} и их критериальные функции направлены на рациональное использование выделенных ресурсов для реализации программы, и чаще всего используются в качестве ограничений при решении задач оптимизации в планах разработки и производства изделия. При формировании плана, большое значение имеет возможность объективной оценки финансовых потерь предприятия в случае не выполнения программы в директивные сроки. Размер

потерь позволяют оценить критерии F_{11} , F_{12} . Так, критерий F_{11} ориентирован на минимизацию суммарного ущерба и выглядит следующим образом:

$$F_{11} = \sum_{i=1}^{n_t} C_i \max \left[0, -\delta_i (t+1) \right]; \quad f_{11} = \min \sum_{i=1}^{n_t} C_i \max \left[0, -\delta_i (t+1) \right],$$

где C_i – стоимость одной единицы времени отрицательного резерва. Критерий F_{12} ориентирован на минимизацию максимального ущерба и имеет следующий вид:

$$F_{12} = \max_{i} C_{i} \left[0, -\delta_{i} \left(t+1 \right) \right]; \quad f_{12} = \min \max_{i} C_{i} \left[0, -\delta_{i} \left(t+1 \right) \right].$$

Критерии F_4 , F_9 , F_{10} , F_{12} являются выравнивающими, остальныеинтегральными. Представленная система критериев характеризуется тем, что каждый критерий определен на конкретном подмножестве исходного множества изделий, то есть он определяется с использованием показателей изделий данного подмножества. Подмножества образуются только зависимости от того, как меняется знак резерва при переходе изделия из t-го в (t+1)-й ИМ. Данное обстоятельство позволяет упростить процедуру оптимизации плана, но в некоторых случаях, для включения изделий в план, достаточно упорядочить их по принципу доминирования. Для исследования критичности принимаемых критериев на определенных подмножествах, рассмотрим разделение исходного множества - U изделий на пересекающиеся $U_1,\ U_2,\ U_3,$ на которых определены соответствующие критерии. В таблице 3 показано соответствие между подмножествами и критериями, изменение знаков резервов.

Таблица 3 Актуальность временных, номенклатурных и финансовых критериев на подмножествах их определения

	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_{11}	F_{12}
U_1	+	-	+	+	-	-	-	+	+
U_2	-	-	-	-	-	+	-	-	-
U_3	ı	+	+	+	ı	ı	ı	+	+
U_4	ı	ı	-	-	1	ı	+	ı	-
U_5	-	-	-	-	+	-	-	-	-

Непересекающиеся подмножества $U_{\rm 1}, U_{\rm 2}, U_{\rm 3}, U_{\rm 4}$ имеют следующий вид:

$$\begin{split} U_1 &= \big\{ i \in U : \mathcal{S}_i \left(t \right) \geq 0 \wedge \mathcal{S}_i \left(t + 1 \right) \leq 0 \big\}; U_2 = \big\{ i \in U : \mathcal{S}_i \left(t \right) \geq 0 \wedge \mathcal{S}_i \left(t + 1 \right) \geq 0 \big\}; \\ U_3 &= \big\{ i \in U : \mathcal{S}_i \left(t \right) \leq 0 \wedge \mathcal{S}_i \left(t + 1 \right) \leq 0 \big\}; U_4 = \big\{ i \in U : \mathcal{S}_i \left(t \right) \geq 0 \wedge \mathcal{S}_i \left(t + 1 \right) = 0 \big\}; \\ U_1 &\cap U_2 \cap U_3 \cap U_4 = \varnothing \,. \end{split}$$

Подмножество U_1 состоит из изделий, резервы которых меняют знак в том случае, если изделия не принимаются к изготовлению или разработке в текущем ИМ; подмножество U_2 содержит изделия, резервы которых не меняют положительный знак в следующем ИМ; подмножество U_3 образуют изделия с отрицательным резервом в текущем ИМ; к подмножеству U_4 принадлежат изделия, резерв которых равен нулю, что подтверждает их своевременное изготовление. Критерий F_5 образует подмножество U_5 , в который входят все изделия с отрицательным резервом сроков создания в плановом периоде, то есть $U_5 = \left\{i \in U : T_o - T_{nn} \leq 0\right\}$ либо $U_5 = \left\{i \in U : \delta_i\left(t_{nn}\right) \leq 0\right\}$, где t_{nn} -последний ИМ в плановом периоде. Все остальные изделия из подмножества $U_6 = U/U_5$ были изготовлены в течение планового периода, независимо от

нарушения директивных сроков. В таблице 4 знаком «+» обозначены актуальность, то есть применимость того или иного критерия на подмножестве его определения.

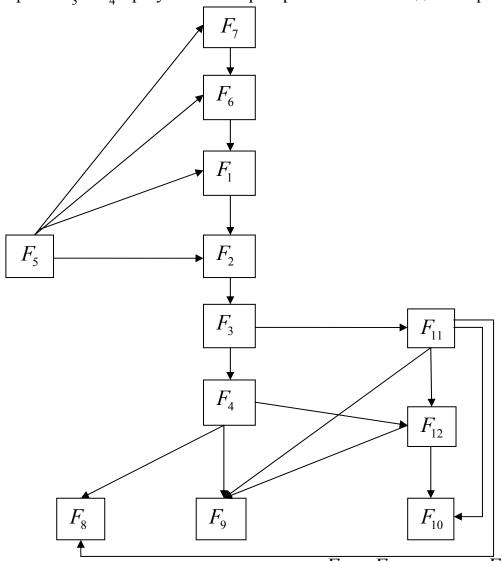
Таблица 4 Изменение знаков резервов, критерии и множества их определения

		и резервов	1 /	Критерии Критерии	Множества		
текущий интервал		следую і интерн			определения критериев		
$\delta(t)$	+	$\delta(t+1)$	+	F_6	U_2		
$\delta(t)$	+	$\delta(t+1)$	-	$F_1, F_3, F_4, F_5, F_{11}, F_{12}$	U_1		
$\delta(t)$	-	$\delta(t+1)$	-	$F_2, F_3, F_4, F_5, F_{11}, F_{12}$	U_3		
$\delta(t)$	+	$\delta(t+1)$	0	F_7	U_4		

Некоторые критерии определены на двух подмножествах.

критерии	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_{11}	F_{12}
подмножества	U_1	U_3	$U_1 \cup U_3$	$U_1 \cup U_3$	U_{5}	U_2	U_4	$U_1 \cup U_3$	$U_1 \cup U_2$

Последовательность оптимизации плана по критериям может быть обозначена по разному, в зависимости от задачи планирования, которую ставит ЛПР. Таким образом, определяются два варианта оптимизации плана по В критериям. первом случае предпочтение отдается временным номенклатурным критериям, где применяется последовательность доминирования критериев, которая способствует уменьшению количества изделий с отрицательным резервом и наиболее полному выполнению программы по срокам и номенклатуре. На рисунке 1 стрелками обозначено доминирование критериев, где ресурсные и финансовые оценивают качество программы по эффективному использованию ресурсов предприятия, а также размер ущерба, который может быть понесен вследствие нарушения сроков создания изделий. Наиболее значимым является критерий F_7 , благодаря которому исключаются изделия с отрицательным отклонением от директивного срока. Остальные критерии ориентированы на уменьшение отрицательного резерва изделий по мере их приближения к концу планового периода. Во втором варианте оптимизации плана по критериям, предпочтение отдается финансовым критериям F_{11} и F_{12} , которые представляют собой модификацию критериев F_3 и F_4 при условии перестраивания схемы доминирования.



Puc. 1 – Схема доминирования критериев ($F_i o F_j$: критерий F_i доминирует критерию F_j

В заключении исследования системы критериев оптимизации плана реализации инновационной программы предприятия можно сделать следующие

выводы:

- предложенная система критериев всесторонне отражает различные аспекты формирования плана реализации инновационной программы;
- упрощается процедура оптимизации за счет выделения из исходного множества изделий подмножеств;
- система критериев является основой построения процедуры аддитивной селекции набора критериев на каждом интервале моделирования.

Библиографический список

- 1. Горелов Б.А., Гязова М.М. Ключевые показатели эффективности и формирование ориентированного на конечный результат механизма стимулирования в рамках контрактов жизненного цикла // СТИН, № 10, 2017
- 2. Гязова М.М. Совершенствование прогнозирования и диверсификация как инструменты обеспечения экономической устойчивости авиакомпании: Монография Москва. УМЦ «Триада», 2015. 175с.
- 3. Катренко А.В. Системный анализ объектов и процессов компьютеризации. Львов: «Новый свет-2000», 2003.
- 4. Стратегическое управление организационно-экономической устойчивостью фирмы под. ред. Колобова А.А. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.

References

- 1. Gorelov BA, Gayazova M.M. Key performance indicators and the formation of an outcome-oriented incentive mechanism under life-cycle contracts. // STIN, No. 10, 2017
- 2. Gayato M.M. Perfection of forecasting and diversification as instruments of ensuring the economic sustainability of the airline: Monograph. Moscow. UMC «Triad», 2015. 175s.
- 3. Katrenko A.V. System analysis of objects and processes of computerization. Lviv: «The New World-2000», 2003.
- 4. Strategic management of the organizational and economic stability of the firm under. Ed. Kolobova A.A. Moscow: Izdatelstvo MGTU im. N.E. Bauman, 2001.