Модель и метод комплексной стандартизации сложных технических систем

Model and Method for Integrated Standardization of Complex Technical Systems

УДК 006.065:519.2
Получено: 25.03.2022 Одобрено: 16.04.2022 Опубликовано: 25.06.2022

Анисимов В.Г.
Д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, профессор Санкт-Петербургского Политехнического университета им. Петра Великого
e-mail: an-33@yandex.ru

Anisimov V.G.
Doctor of Engineering, professor, Honored Scientist of the Russian Federation, professor at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
e-mail: an-33@yandex.ru

Анисимов Е.Г.
Д-р техн. наук, д-р военных наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, профессор Российского университета дружбы народов
e-mail: an-33@rambler.ru

Anisimov E.G.
Doctor of Engineering, professor, Doctor of Military Sciences, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Professor Peoples' Friendship University of Russia
e-mail: anis.an-33@rambler.ru

Богоева Е.М.
Канд. экон. наук, научный сотрудник научно-исследовательского института, Российская таможенная академия

Bogoeva E.M.
Candidate of Economic Sciences, Research Scientist of Scientific Research Institute, Russian Customs Academy

Веселко А.А.
Канд. экон. наук, старший преподаватель кафедры таможенного дела Российского университета дружбы народов,
e-mail: veselko-aa@rudn.ru

Veselko A.A.
Candidate of Economic Sciences, Senior Lecturer of Customs Department, Peoples' Friendship University of Russia
e-mail: veselko-aa@rudn.ru

Сысуев С.Ю.
Канд. военных наук, Михайловская военная артиллерийская академия, доцент

Sysuev S.Yu.
Candidate of Military Sciences, Mikhailovskaya Military Artillery Academy, Associate Professor
e-mail: Sysuev1971@mail.ru

Аннотация
В статье предложены модель и метод комплексной стандартизации сложных технических систем, предназначенные для формирования рациональной с технической и экономической точек зрения номенклатуры сложных технических систем и включаемых в их состав элементов, комплексов и подсистем. Применение этой модели и метода в соответствующих системах поддержки принятия решений позволяет реализовать принцип комплексной стандартизации, создающий возможность координировать действия всех участвующих в разработке и производстве таких систем исполнителей и взаимно увязывать требования к системе и ее составным частям в интересах обеспечения соответствия ее потребительских свойств динамике спроса.
Ключевые слова: сложная техническая система, стандартизация, модель, метод оптимизации.

Abstract
The article proposes a model and method for the complex standardization of complex technical systems designed to form a rational, from a technical and economic point of view, the nomenclature of complex technical systems and the elements, complexes and subsystems included in them. The application of this model and method in the corresponding decision support systems makes it possible to implement the principle of complex standardization, which makes it possible to coordinate the actions of all performers involved in the development and production of such systems and mutually link the requirements for the system and its components in order to ensure that its consumer properties correspond to demand dynamics.
Keywords: complex technical system, standardization, model, optimization method.

Введение

Одним из важнейших направлений развития экономики РФ в современных условиях является интенсификация импортозамещения в производстве сложных технических систем (СТС) в ключевых отраслях промышленности, к которым относятся: машиностроение, оборонно-промышленный комплекс, авиационная и ракетно-космическая отрасль, судостроение, электронная промышленность и микроэлектроника и др. [1 - 6]. Успешная реализация такого развития неразрывно связана с решением проблем стандартизации, направленных на обеспечение конкурентоспособности производимой продукции за счет повышения соответствия ее потребительских свойств динамике спроса и учета возможных торговых барьеров, а также снижения себестоимости продукции [7 – 13, 23]. При этом одной из актуальных задач стандартизации продукции, представляющей собой сложные технические системы, является задача оптимизации их параметрических рядов, а также параметрических рядов их составных частей. Сложность решения этой задачи обусловливает необходимость разработки соответствующих моделей и методов поддержки принятия решений. Построение модели и метода комплексной стандартизации сложных технических систем является целью данной статьи.

2. Формализованная постановка задачи

Имеется множество X СТС, непосредственно предназначенных для удовлетворения спроса. Есть также изделия, являющиеся комплектующими составными частями СТС. Эти изделия распределены по уровням таким образом, что изделия, относящиеся к нижним уровням, могут использоваться только для создания изделий верхних уровней СТС. Задача формирования СТС состоит в определении рациональной с технической и экономической точек зрения номенклатуры СТС и включаемых в их состав изделий нижних уровней [14 - 18]. Количественно требуемый объем задач будем выражать через потребность в технических средствах, параметры которых позволяют выполнить требуемое множество задач.

Для математической формализации этой задачи введем следующие обозначения.

Задано множество $X = \{x_{ij}, \ i = \overline{1, M}, \ j = \overline{1, N}\}$ СТС, предназначенных для удовлетворения спроса, *i*- идентификатор типа СТС. *M* - количество типов СТС.

Каждому *i* -му типу СТС соответствуют варианты их реализации *j* – идентификатор варианта*, N* – количество вариантов.

Значения основных параметров этих вариантов составляют *i*-й параметрический ряд типов СТС, в котором *j*-й вариант может заменить варианты 1,2,..., *j*-1. Элементы x_{ij} множества *X* упорядочены в виде матрицы $\|x_{ij}\|_{M \times N}$, где x_{ij} >0 – количество *j*-х вариантов в *i*–м параметрическом ряду СТС;

Задано множество $Y = \{y_{pq}, \ \ p = \overline{1, K}, \ q = \overline{1, L}\}$ составных частей, включающее *К* типов комплектующих изделий, предназначенных для создания изделий вышележащих уровней.

p – идентификатор типа составной части; *К* – количество тип*ов.*

Каждому *p*-му типу составной части соответствуют варианты возможной реализации 1,2,...,*q*,..., *L, где q* – идентификатор варианта, *L* – количество вариантов.

Значения их основных параметров составляют *p*-й параметрический ряд комплектующих изделий, в котором *q*-й вариант может заменить варианты 1,2,…, *q*-1. Элементы y_{pq} множества *Y* упорядочены в виде матрицы $\|y_{pq}\|_{K \times L}$, где $Y_{pq} \geq 0$ – количество *q*-х вариантов изделий в *p*-м параметрическом ряду.

Имеется множество {1,2,…, *z*,…*Z*} видов задач, которые необходимо выполнить СТС множества *X*. *z* – идентификатор задачи*, Z* – количество типов задач.

Задано множество *R*=$\{r_1, r_2, ..., r_z, ..., r_Z\}$ потребностей в задачах каждого вида.

Количество *j*-х вариантов СТС из *i*-того параметрического ряда, используемых для выполнения одной задачи вида *z*, задается с помощью коэффициента кратности применения w_{ijz}>0. Тогда величина x_{ijz}=$w_{ijz}r_z$ определит общее количество *j*-х вариантов СТС из *i*-того параметрического ряда, используемых для выполнения задач вида *z*, а величина $x_{ijz} = \sum_{z=1}^{z} w_{ijz} r_z$ - всех задач множества *R*.

Возможность комплектации определяется коэффициентом кратной совместимости $w_{pq}(\mu, \nu)$, где $w_{pq}(\mu, \nu)$>0 – количество *q*-х вариантов изделий из *p*–го параметрического ряда, необходимых для комплектации *ν*-го варианта из *μ*–го параметрического ряда. При этом величины *μ*, *ν* могут принимать значения *μ*=1,2,...,*i*,…,*M*, *ν*=1,2,...,*j*,…,*N*, если комплектуется СТС; *μ*=1,2,...,*p*–1, *ν*=1,2,...,*q*,…,*L*, если комплектуется составная часть СТС.

Формально задача состоит в минимизации целевой функции

$$C = \sum_{x_{ij} \in X} U_{ij}(x_{ij}) + \sum_{y_{pq} \in Y} V_{pq}(y_{pq}) \qquad (1)$$

при ограничениях:

$$\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} x_{ijx} / w_{ijz} = r_z, \ z = \overline{1, Z}; \qquad (2)$$

$$\sum_{\gamma=1}^{N} x_{ij} \geq \sum_{j=\gamma}^{N} x_{ijz}, \ \gamma = \overline{1, N}, \ i = \overline{1, M}; \qquad (3)$$

$$\sum_{j=1}^{N} sgn \ x_{ij} \leq N_i, \ N_i \leq N, \ i = \overline{1, M}; \qquad (4)$$

$$\sum_{q=\delta}^{L} sgn\ y_{pq} \geq \sum_{q=\delta}^{L}\left[\sum_{\mu=1}^{M}\sum_{\nu=1}^{M} w_{pq}(\mu,\nu) + \sum_{\mu=1}^{p-1}\sum_{\nu=1}^{L} w_{pq}(\mu,\nu) y_{\mu\nu}\right], \quad \delta=\overline{1,L},\ p=\overline{1,K}; \qquad (5)$$

$$\sum_{q=1}^{L} sgn\ y_{pq} \leq L_p,\ L_p \leq L,\ p=\overline{1,K}; \qquad (6)$$

$$\sum_{q=q_1+1\leq q_2}^{q_2} y_{pq} \geq \sum_{\mu=1}^{M} w_{pq_2}(\mu j_2) \sum_{\nu=j_1+1\leq j_2}^{j_2} x_{\mu\nu z} + \sum_{\mu=1}^{p-1} w_{pq_2}(\mu,q_4) \sum_{\nu=q_3+1\leq q_4}^{q_4} y_{\mu\nu},\ p=\overline{1,K}. \qquad (7)$$

Здесь $U_{ij}(x_{ij})$, $V_{pq}(y_{pq})$ – аддитивные функции, характеризующие затраты, связанные с разработкой, производством и эксплуатацией j-го варианта СТС из i-того параметрического ряда и q-го варианта из p–го параметрического ряда составных частей соответственно:

$$U_{ij}(x_{ij}) = \begin{cases} 0, \text{ если } x_{ij}=0; \\ U_{ij}^0 + U_{ij}x_{ij}, \text{ если } x_{ij}>0; \end{cases}$$

$$V_{ij}(y_{ij}) = \begin{cases} 0, \text{ если } y_{pq}=0; \\ V_{pq}^0 + V_{pq}y_{pq}, \text{ если } y_{pq}>0, \end{cases}$$

в которых величины $U_{ij}^0, U_{ij}, V_{pq}^0, V_{pq}$ - не убывают с ростом i, j и p, q;

N_i ,L_p – ограничения на количество элементов i-го, p–го параметрических рядов, соответственно;

(j_1=0,1,...,j,...N_i–1, j_2=1,2,…,j,...,N_i), (q_1=0,1,…,q,...,L_p–1, q_2=1,2,…,q,...,L_p), (q_3=0,1,…,q,...,L_μ–1, q_4=1,2,…,q,...,L_μ),-фиксированные номера следующих друг за другом вариантов СТС и ее составных частей, включенных в i , p, μ-й параметрические ряды соответственно.

Ограничения (2), (7) обеспечивают достаточность выпуска основных изделий и их составных частей для выполнения всех задач в комплектации вышележащих уровней элементами нижележащих уровней соответственно.

Ограничения (3), (5) являются условиями достаточности основных изделий и составных частей для проведения замен внутри соответствующих рядов, ограничения на длину которых задаются с помощью условий (4), (6).

3. Метод решения

Для решения многоуровневых задач оптимизации параметрических рядов используется, как правило, метод динамического программирования. Однако его применение для решения практических задач стандартизации вызывает значительные вычислительные трудности. С целью преодоления этих трудностей предлагается использовать для решения задачи (1) - (7) идею встречного решения функциональных уровней.

Сущность предлагаемого метода заключается в следующем. Методом динамического программирования решаем M+$К$ задач по определению одномерных параметрических рядов. Затем с использованием условий (2), (7) проверяем полученное решение на оптимальность. Если эти условия выполняются, то совокупность полученных рядов будет оптимальным многоуровневым параметрическим рядом. Иначе переходим ко второму этапу решения. В этом случае вся задача (1) - (7) решается методом ветвей и границ. Результаты, полученные на первом этапе, используются для оценки нижних границ решений.

Ограничения (2) - (7), а также использование результатов, полученных на первом этапе, существенно сужает область допустимых решений задачи (1) - (7). Эти обстоятельства позволяют достаточно эффективно применять метод ветвей и границ. Общая схема метода решения задачи показана на рис. 1.

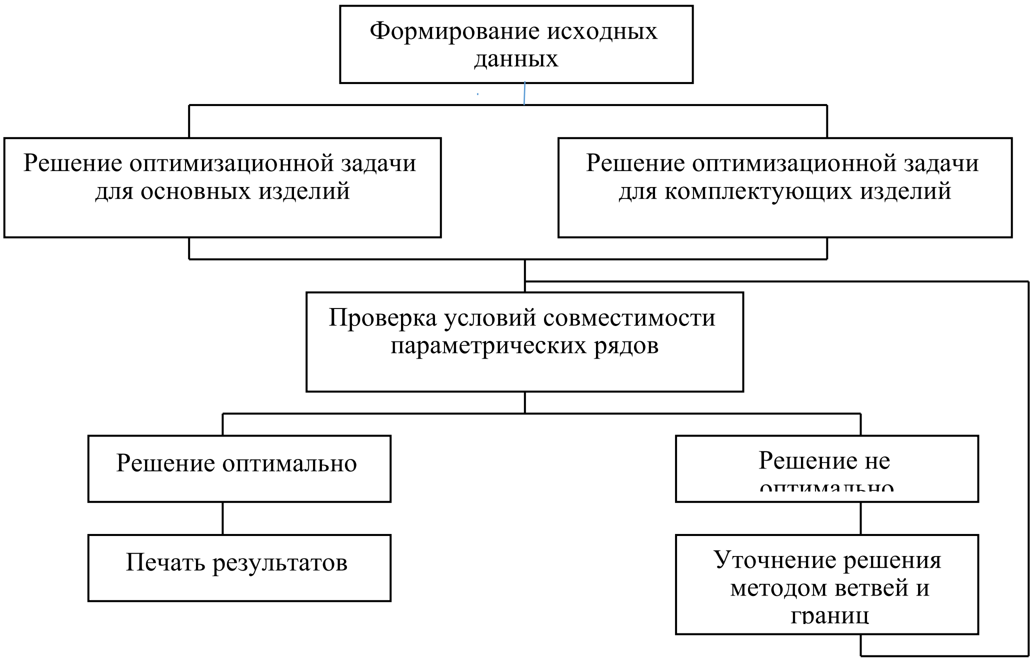

Рис. 1. Общая схема метода решения задачи комплексной стандартизации сложных технических систем

На первом этапе решаются две группы задач:

$$U_i = \min_{x_{ij} \in X} \sum_{j=1}^{N} u_{ij}(x_{ij}), \quad i = \overline{1, M} \tag{8}$$

при ограничениях

$$\sum_{j=\gamma}^{N} x_{ij} \geq \sum_{j=\gamma}^{N} x_{ij} z, \quad \gamma = \overline{1, N}; \tag{9}$$

$$\sum_{j=1}^{N} sgn\ x_{ij} \leq N_i, \quad N_i \leq N; \tag{10}$$

и

$$V_p = \min_{y_{pq} \in Y} \sum_{q=1}^{L} v_{pq}(y_{pq}), \quad p = \overline{1, K} \tag{11}$$

при ограничениях

$$\sum_{q=\delta}^{L} sgn\ y_{pq} \geq \sum_{q=\delta}^{L} \left[\sum_{\mu=1}^{M} \sum_{\nu=1}^{M} w_{pq}(\mu,\nu) x_{\mu\nu z} + \sum_{\mu=1}^{p-1} \sum_{\nu=1}^{L} w_{pq}(\mu,\nu) y_{\mu\nu} \right], \delta = \overline{1, L}; \tag{12}$$

$$\sum_{q=1}^{L} sgn\ y_{pq} \leq L_p, L_p \leq L. \tag{13}$$

Задачи (8) - (10) и (11) - (13) целесообразно решать методом динамического программирования.

Введем обозначения:

$$U_i(n,h) = \min_{x_{ij} \in X} \sum_{j=0}^{N} u_{ij}(x_{ij}), n = 0,1,\ldots,N_i, N_i \leq N,$$

при ограничениях

$$\sum_{j=0}^{n} sgn\ x_{ij} \leq N_i;$$

$$U_i(0,h) \equiv 0, U_{i0}(x_{i0}) \equiv 0, x_{i0} \equiv w_{i0z}, r_z \equiv 0.$$

$$V_p(l,q)=\min_{y_{pq}\in Y}\sum_{q=0}^{l}V_{pq}(y_{pq}),$$

$$l=0,1,...,L,\ g=0,1,...,L_p,\ L_p\le L,\ p=1,2,...,K$$

при ограничениях

$$\sum_{q=\delta}^{l}y_{pq}\ge\sum_{q=\delta}^{l}\left[\sum_{\mu=1}^{M}\sum_{\nu=1}^{N}w_{pq}(\mu,\nu)x_{\mu\nu z}+\sum_{\mu=1}^{p-1}\sum_{\nu=1}^{L}w_{pq}(\mu,\nu)y_{\mu\nu}\right],$$

$$\delta=l,l-1,...,0;$$

$$\sum_{q=\gamma}^{l}sgn\ y_{pq}\le L_p,\ L_p\le L;$$

$$V_p(0,g)\equiv 0,\ V_{p0}(y_{p0})\equiv 0,\ y_{p0}\equiv w_{p0}(\mu,\nu)\,y_{\mu\nu}\equiv 0.$$

С учетом введенных обозначений решение задач (8)-(10), (11)-(13) сводится к решению рекуррентных уравнений

$$U_i(n,h)=\min_i\left\lfloor U_i(j,h-1)+U_{ijn}\right\rfloor,\ h=0,1,...,N_i,\ N_i\le N \tag{14}$$

j=0,1,…,n, n=0,1,…,N-N_i+h, i=1,2,…,M;

$$V_p(l,q)=\min_q\left\lfloor V_p(q,q-1)+V_{pql}\right\rfloor,\ q=0,1,...,L_p,\ L_p\le L,$$

q=0,1,…,l, l=0,1,…,L-L_p+q, p=1,2,…,K (15)

$$U_{ijn}=\sum_{\gamma=j+1\le n}^{n}x_{i\gamma z}(U_{in}^{0}+U_{in}),\ U_{inn}\equiv 0;$$

$$V_{pql}=\sum_{\delta=q+1\le l}^{l}\left[\sum_{\mu=1}^{M}\sum_{\nu=1}^{N}w_{p\gamma}(\mu,\nu)x_{\mu\nu z}+\sum_{\mu=1}^{p-1}\sum_{\nu=1}^{L}w_{p\gamma}(\mu,\nu)y_{\mu\nu}\right],\ V_{pll}\equiv 0.$$

Рекуррентные выражения (14), (15) позволяют представать возможные варианты параметрических рядов графически. С этой целью в плоскости переменных $n=\overline{0,N}$, $h=\overline{0,N_i}$ и $q=\overline{0,L}$, $g=\overline{0,L_P}$ строятся графы возможных вариантов параметрических рядов СТС и ее составных частей соответственно. Длины дуг в графах определяются величинами U_{ijn} и V_{pql}. Решение уравнений (14), (15) сведется в этом случае к определению кратчайшего пути в графе из начальной вершины n=0, h=0 и l=0, q=0 в конечную n=N, h=N_i и l=L, q=L. Решив уравнения (14), (15), найдем множество параметрических рядов X_i, Y_p. Если условия (2), (7) для них выполняются, то полученное решение является оптимальным решением задачи (1) - (7).

В противном случае переходим ко второму этапу решения.

Для этого предварительно введем обозначения:

а) для i-того графа СТС:

$A_i(n,\ h)$ - множество дуг, соединяющих исходную вершину (N, N_i) с (n, h) и допускающих выполнение условий (2), (7);

$D_i(A)$ - множество дуг, соединяющих вершину (n, h) с вершинами (j, h-1), (j<n);

$E_i(A)$ - множество дуг, соединяющих вершину (n, h) с вершинами (j, h-1), введение которых в множество $A_i(n,\ h)$ приводит к нарушению условий (2), (7) или неоптимальному решению;

$G_i(A)=D_i(A)\backslash E_i(A)$ - множество дуг графа, соединяющих вершину (n, h) с вершинами (j, h-1), введение которых в множество $A_i(n,\ h)$ возможно;

б) для p-го графа составных частей:

$B_p(l,g)$ - множество дуг, соединяющих исходную вершину (L, L_p) с вершиной (l,g) и допускающих выполнение условия (7);

$D_p(B)$ - множество дуг, соединяющих вершину (l,g) с вершинами $(g,g\text{-}1)$, $(g<l)$;

$E_p(B)$ - множество дуг, соединяющих вершину (l, g) с вершинами $(g, g\text{-}1)$, введение которых в множество $B_p(l, g)$ приводит к нарушению условия (7) или неоптимальному решению;

$G_p(B)= D_p(B)\backslash E_p(B)$ - множество дуг графа, соединяющих вершину (l, g) с вершинами $(g, g\text{-}1)$**,** введение которых в множество $B_p(l, g)$ возможно;

в) для дерева возможных вариантов:

$\Lambda_\varphi = \left\{ \bigcup_{i=1}^{M} A_i(n,h) \right\} \bigcup \left\{ \bigcup_{p=1}^{k} B_p(l,g) \right\}$ - множество дуг ветви из начальной нулевой вершины в φ-ю вершину;

$\overline{U_i}(n,h) = \sum_{nj \in A_{i(}(n,h)} U_{inj}$ - затраты, связанные с обеспечением заданных потребностей $\sum_{Z=1}^{Z} w_{ijz} r_z$, $j=n+1,n+2,\ldots,N$ в СТС из i-того параметрического ряда;

$\overline{V_p}(l,g) = \sum_{\lg \in B_p(l,g)} V_{p\lg}$ - затраты, связанные с обеспечением заданных потребностей $w_{pg}(\mu,\nu) \sum_{Z=1}^{Z} w_{\mu\nu z} r_z$, $\nu=n+1,n+2,\ldots,N$, $\mu=1,2,\ldots,M$ и $w_{pq}(\mu,\nu)y_{\mu\nu}$, $\nu=l+1,l+2,\ldots,L$ в составных частях из p–го ряда.

Порядок построения дерева вариантов зависит от множеств $E_i(A)$, $G_i(A)$, $E_p(B)$, $G_p(B)$, поэтому определим условия их формирования.

Допустим, что φ–й вершине дерева возможных вариантов соответствуют множества $A_i(n,h)$ *и* $B_p(l,g)(n>0,\ h>0,\ l>0,\ g>0)$. Если $n \geq l$, то выбирается дуга для включения в множество $A_i(n, h)$, если $n<l$, то множество $B_p(l, g)$, а множество $A_i(n, h)$ при этом не изменяется:

а) $n=l$: $E_i(A)=\varnothing$, $G_i = (A)=\{(n, j)|\ j=n\text{-}1,\ n\text{-}2,\ldots,0\}$;

б) $n>l$: $E_i(A)=\{(n,j)|\ j=l\text{-}1,\ l\text{-}2,\ldots,0\}$,

$G_i\,(A)=\{(n,j)|\ j=n\text{-}1,\ n\text{-}2,\ldots,l\}$

в) $n<l$: $E_p(B)=\{(l,q)|\ q=l\text{-}1,\ l\text{-}2,\ldots,n+1\}$,

$G_p(B)=\{(l,q)|\ q=l,\ l\text{-}1,\ldots,0\}$.

Дуги для включения в множество $A_i(n,\ h)$, $B_p(l,\ g)$ выбираются с помощью следующих условий:

$$\min_{n_j \in G_i(A)} \left[U_i(n,h) + U_{inj} + \overline{U_i}(j,h-1) \right],\ i = \overline{1,M}, \tag{16}$$

$$\min_{l_g \in G_p(B)} \left[U_p(l,g) + U_{p\lg} + U_p(g,g-1) \right],\ p = \overline{1,K}. \tag{17}$$

Дуга (n,j), для которой выполняется условие (16), вводится в множество $A_i(n,h)$, а дуга и $(l,\ g)$, для которой справедливо условие (17), - в множество $B_p(l,\ g)$. Выбирая последовательно, в зависимости от соотношение n и l, дуги $(n,\ j)$, $(l,\ g)$ с помощью условий (16), (17), формируем ветвь дерева вариантов, соединяющую начальную вершину ($A_0 = \varnothing$) с φ–й вершиной. Следовательно, ветвь будет состоять из дуг $(n,j)\epsilon A_i(n,h)$ *и* $(l,g)\epsilon B_p(l,\ g)$.

Рассмотренный порядок построения ветви дерева вариантов справедлив и для случая, когда комплектуется не СТС, а ее составная часть. То, что касалось СТС, будет относиться к составной части, а рассуждения относительно комплектующего ее изделия останутся прежними.

Процесс построения ветви заканчивается при n=l=0 для всех $i = \overline{1,M}, p = \overline{1,K}$. Если для нее выполняется условие (2), то величина

$$C_0\sum_{i=1}^{M}U_i(0,h)+\sum_{p=1}^{K}V_p(0,g),$$

соответствующая данной ветви, совместно с множествами $A_i(0,h)$ и $B_p(0,g)$ определит допустимое решение задачи (1) - (7). В противном случае процесс построения дерева вариантов продолжается.

Отсечение бесперспективных ветвей производится по величине нижних границ решения, которые находят для каждой вершины с помощью выражения

$$H_\varphi(A,B)=\sum_{i=1\neq i_\varphi}^{M}U_i(N,N_i)+U_{i_\varphi}(N,N_{i_\varphi})+\sum_{p=1\neq p_\varphi}^{K}V_p(L,L_p)+V_{p_\varphi}(L,L_{p_\varphi}), \qquad (18)$$

где величины $U_{i\varphi}(N,N_{i\varphi})$, $V_{p\varphi}(L,L_{p\varphi})$, определяемые с помощью условий (16), (17), больше нуля, если для расчета $H_\varphi(A,B)$ используется ряд $X_{i\varphi}$, $Y_{p\varphi}$; 0 в противном случае. Если выполняется неравенство

$$H_\varphi(A,B)<C_0, \qquad (19)$$

то ветвь является перспективной и продолжается процесс ее построения. В случае невыполнения условия (19) ветвь бесперспективна и дуга (n,j) или (l,g), ведущая в данную вершину, исключается из множества $A_i(n,h)$ или $B_p(l,g)$ и включается в соответствующее множество $E_i(A)$ или $E_p(B)$, чтобы исключить ее повторный просмотр из предыдущей вершины.

В процессе решения величина C_0 может последовательно уточняться, так как при для всех $n=l=0$ для всех $i=\overline{1,M}$, $p=\overline{1,K}$ и $H_\varphi(A,B)<C_0$ принимается новое значение C_0, соответствующее данной вершине. Если для начальной вершины дерева вариантов $G_i(A)=\emptyset$, $G_p(B)$, т.е. нет ни одной ветви, просмотр которой мог бы привести к уменьшению последнего допустимого решения C_0, то вычислительный процесс заканчивается. В этом случае величина C_0 будет являться оптимальным значением C_{0pt} целевой функции **(**1**)** при ограничениях **(**2) - (7). Совокупность множеств $A_i(n,h)$, $i=\overline{1,M}$ *и* $B_p(l,\ g)$, $p=\overline{1,K}$, соответствующих данной ветви, определяет искомый оптимальный многоуровневый параметрический ряд СТС

$$X_{opt}^{Y}=\left\{\bigcup_{i=1}^{M}X_i\right\}\bigcup\left\{\bigcup_{p=1}^{K}Y_p\right\}.$$

4. Заключение

Инновационное развитие сложных технических систем является наукоемким и дорогостоящим процессом. Оно не может протекать стихийно, так как производители и потребители соответствующей продукции заинтересованы в эффективности этого процесса. Инструментом обеспечения его эффективности может быть применение при управлении развитием СТС соответствующих математических моделей и методов. Предложенные в статье модель и метод позволяют реализовать принцип комплексной стандартизации создающий возможность координировать действия всех участвующих в разработке и производстве СТС исполнителей и взаимно увязывать требования к системе и ее составным частям [19 - 22] в интересах обеспечения ее качества и конкурентоспособности. Это обуславливает полезность применения разработанной модели и метода в системах поддержки принятия решений при управлении инновационным развитием СТС.

Литература

1. *Анисимов Е.Г.* Экономическая политика в системе национальной безопасности Российской Федерации / *Е.Г. Анисимов* [и др.] // Национальные приоритеты России. 2016. № 3 (21). С. 22-32.

2. *Анисимов Е.Г.* Сущность и проблемы управления обеспечением безопасности и обороной государства / *Е.Г. Анисимов* [и др.] // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2016. № 3 (93). С. 3-10.

3. *Чварков С.В.* Обоснование путей обеспечения устойчивости планов инновационного развития оборонно-промышленного комплекса / *С.В. Чварков* [*и др*.] // Военная мысль. 2019. № 7. С. 114-119.

4. *Тебекин А.В.* Методический подход к моделированию процессов формирования планов инновационного развития предприятий / *А. В. Тебекин* [*и др*.] // Журнал исследований по управлению. 2019. Т. 5. № 1. С. 65-72.

5. *Анисимов В.Г.* Модель поддержки принятия решений при формировании товарной стратегии и производственной программы предприятия / *В.Г. Анисимов* [*и др*.] // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экономика. 2016. № 2. С. 62-73.

6. *Тебекин А.В.* Модель прогноза стоимости и сроков модернизации промышленных предприятий / *А.В. Тебекин, Т.Н. Сауренко* [*и др*.] // Журнал исследований по управлению. 2019. Т. 5. № 3. С. 31-37.

7. *Анисимов В.Г.* Методы и модели стандартизации и унификации в управлении развитием военно-технических систем / *В.Г. Анисимов* [и др.].- Москва: Военная академия Генерального штаба Вооруженных Сил Российской Федерации; 2004.- 279 с.

8. *Липатова Н.Г.* Понятия и определения в области исследования проблем таможенного дела / *Н.Г. Липатова* [*и др*.].- Москва: Российская таможенная академия, 2010.- 91 с.

9. *Черныш А.Я., Анисимов Е.Г.* Концепция построения теории таможенного дела // Вестник Российской таможенной академии. 2009. № 3. С. 5-11.

10. *Чварков С.В.* Модель планирования процессов производства ракетно-артиллерийского вооружения / *С.В. Чварков* [*и др*.] // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2018. № 3 (103). С. 141-147.

11. *Анисимов В.Г.* Моделирование оптимизационных задач поддержки принятия решений в инновационном менеджменте / *В.Г. Анисимов* [*и др*.] // Вестник Российской таможенной академии. 2016. № 1. С. 90-98.

12. *Анисимов В.Г.* Модель поддержки принятия решений при формировании товарной стратегии и производственной программы предприятия / *В.Г. Анисимов* [*и др*.] // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экономика. 2016. № 2. С. 62-73.

13. *Saurenko T.N., Gapov M.R.* Formalization of planning procedureproduction process of the complex industrial patterns of vertical integration / *T.N. Saurenko, M.R. Gapov* [*и др*.] // Экономические стратегии ЕАЭС: проблемы и инновации: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции.- Москва: Российский университет дружбы народов, 2018. С. 154-161.

14. *Сауренко Т.Н* Оптимизация параметрических рядов продукции предприятия с учетом случайности рыночного спроса и упущенной выгоды / *Т.Н. Сауренко* [*и др*.] // Журнал исследований по управлению. 2022. Т. 8. № 2. С. 3-9.

15. *Крикун В.М., Васильковский С.А.* Многоуровневая задача стандартизации технических комплексов // Стандарты и качество. 1992. № 1. С. 30-32.

16. *Васильковский С.А., Сазыкин А.М.* Модель и метод синтеза облика военно-технических систем путем проектной компоновки из унифицированных модулей // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2015. № 2 (87). С. 10-13.

17. *Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г.* Формальная структура задач стандартизации и унификации при управлении развитием сложных технических систем // Защита и безопасность. 2004. № 4 (31). С. 26-31.

18. *Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г.* Математические модели и методы в управлении развитием сложных технических систем.- Санкт-Петербург, 2004.- 280 с.

19. *Тебекин А.В.* Способ формирования комплексных показателей качества инновационных проектов и программ / *А.В. Тебекин* [*и др*.] // Журнал исследований по управлению. 2018. Т. 4. № 11. С. 30-38.

20. *Тебекин А.В.* Эволюционная модель прогноза частных показателей инновационных проектов (на примере технических инноваций) / *А.В. Тебекин* [*и др*.] // Журнал исследований по управлению. 2019. Т. 5. № 6. С. 55-61.

21. *Тебекин А.В.* Методика сравнительной оценки инновационных проектов по совокупности количественных показателей / *А.В. Тебекин, Т.Н. Сауренко* [*и др*.] // Журнал исследований по управлению. 2019. Т. 5. № 5. С. 84 - 90.

22. *Тебекин А.В*. Модель сравнительной оценки инновационных проектов по совокупности качественных показателей / *А.В. Тебекин, Т.Н. Сауренко* [*и др*.] // Журнал исследований по управлению. 2019. Т. 5. № 4. С. 77-83.

23. *Тебекин А.В*. Менеджмент. Учебник / Москва, 2015. Сер. Бакалавриат. – 384 с.