

ПРИДАНИЕ РОБАСТНЫХ СВОЙСТВ СБОРОЧНЫМ ПРОЦЕССАМ САМОЛЕТОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

© 2017 О.Ф. Соколова, Ф.Е. Ляшко, М.И. Соколова

Институт авиационных технологий и управления
Ульяновского государственного технического университета

Статья поступила в редакцию 29.09.2017

В данной статье рассматривается возможность придания робастных свойств сборочным процессам самолетостроительного производства средствами функционально-стоимостного анализа с обязательным условием использования и автоматизации сетевого планирования, начиная с проектной стадии.
Ключевые слова: процессы сборки самолета, робастные свойства, функционально-стоимостной анализ, сетевое планирование.

Основными направлениями снижения затрат в сложных наукоемких производствах на сегодняшний день являются:

- уменьшение стоимости НИОКР, которые сопровождают весь жизненный цикл изделия, подобного летательному аппарату;
- стандартизация и унификация всех элементов подготовки и запуска в производство нового изделия или модификаций, имеющих существенные отличия;
- снижение, а в идеале полное устранение любых действий, связанных с достижением требуемого результата не с первого раза, то есть на исправление ошибок.

Второе направление достаточно подробно рассмотрено в рамках Toyota Production System (Производственной системы Toyota). Относительно первого и последнего решение возможно за счет закладки во все компоненты процесса ограничений, приводящих к заданному конечному результату – выходу, соответствующего качества. С точки зрения философии речь идет о принципах Total Quality Management (Всеобщего менеджмента качества). Техничко-технологический подход может быть реализован за счет робастного проектирования.

Робастность – устойчивость к помехам. Другими словами, робастное проектирование любого объекта предполагает выявление значимых для его функционирования параметров внутренней и внешней среды, оценки направлений и последствий воздействия этих параметров и

закладки в конструкцию объекта защитного механизма для снижения силы и результатов последних.

Причем, если первоначально речь шла о конструкции материально-вещественных объектов, и робастное проектирование имело своей задачей создать такой процесс их изготовления, на который несущественно влияло бы любое колебание при его осуществлении, то сейчас понятие «объект проектирования» значительно расширилось и распространилось на «результат/выход любой природы», что привело к смене трактования задач проектирования. При этом снижение осязаемости объекта проектирования существенно усложнило построение своего рода схемы причинно-следственных связей за счет роста стохастичности всех параметров и включения в анализ и принятие решения субъективного фактора – когнитивного восприятия эксперта. На взгляд авторов советское «конструирование» перешло в «инжиниринг». И тем интереснее стала задача придания робастных свойств создаваемому объекту.

Сборочные процессы крупных агрегатов и летательного аппарата в целом по шкале осязаемости, количеству факторов воздействия и их стохастичности можно рассматривать как объект верхней границы нижней трети. С одной стороны, результат процесса на выходе – материально-вещественный, кроме того, благодаря развитию компьютерного моделирования можно еще на этапе НИОКР повысить детерминированность процессов, а, значит, и их робастность. С другой стороны, в отличие от любой другой производственной сферы самолетостроительные сборочные процессы требуют значительного участия человека, что в случае применения XYZ-анализа автоматически переносит их в группу Z. Кроме того, они более динамичны, чем, например, штамповка или механическая обработка, и имеют низкую возможность иден-

Соколова Ольга Федоровна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Экономика, управление и информатика». E-mail: sokof1407@rambler.ru

Ляшко Федор Евгеньевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Экономика, управление и информатика». E-mail: lyashkofed@rambler.ru

Соколова Маргарита Ивановна, студент, направление «Информационные системы и технологии». E-mail: sokof1407@rambler.ru

тификационной привязки по ответственности за отклонение от требований.

Здесь задача придания устойчивости к помехам может быть приведена к созданию такой схемы сборки – последовательности выполнения действий, которая позволила бы удовлетворить заданные требования по качеству и срокам с минимизацией затрат по всем направлениям. Такая задача может быть решена средствами функционально-стоимостного анализа с обязательным условием автоматизации процессов проектирования.

Применим метод сетевого планирования и управления разработками в условиях функционирования систем автоматизации проектных и производственных работ при создании проекта нового самолета.

Это позволит разработать априорную сетевую модель, то есть спрогнозировать весь проектно-производственный цикл создания самолета по функции как полезному действию, свойству или состоянию, еще до начала работ по созданию самолета в «металле».

Рассмотрим формализованное проектирование сетевой модели [9].

Пусть построен сетевой график и сетевая модель проекта агрегата самолета. Построим алгоритмы, позволяющие пронумеровать события (вершины) так, что бы для любой работы (P_i, P_j) выполнялось неравенство $i < j$, что во многих процедурах сборки и задачах представляет существенное удобство.

Рассмотренный частный случай редко встречается на практике сборочного производства, однако в проектных работах, особенно при разработке проектно-технологической документации, применяется. Наиболее общей является ситуация, когда каждое событие соединено лишь с некоторыми из остальных, то есть сеть не сильно разветвлена.

В этом случае, если вычеркнуть все дуги, выходящие из события P_0 , которому присваивается ранг 0, может случиться, что несколько событий окажутся без входящих дуг. Назовем эти события – событиями первого ранга. Максимальное число дуг пути, соединяющего P_0 с любым из них, равно единице.

Вычеркнув все дуги, выходящие из событий первого ранга, получим ряд событий без входящих дуг, которые назовем событиями второго ранга. Каждое событие второго ранга обязательно соединено с P_0 посредством некоторого события первого ранга, то есть путем, состоящим из двух дуг. Хотя некоторые события второго ранга могут быть, кроме того, соединены с P_0 непосредственно, то есть путем, состоящим из одной дуги, но максимальное число дуг пути из P_0 в любое событие второго ранга всегда равно двум, и это характеризует события второго ранга.

Далее, нумерацию событий выполним так. Единственному событию P_0 нулевого ранга присвоим номер 0. Событиям первого ранга присвоим в произвольном порядке номера: 1, 2, ..., K_1 , событиям второго ранга номера – $(K_1 + 1)$, ..., $(K_1 + K_2)$ и т.д. Так как события одного ранга между собой не соединены, а события меньшего ранга имеют меньший индекс, то в пронумерованной сети для любой дуги (P_i, P_j) всегда $i < j$. Следовательно, все события сети единственным образом распределяются по рангам. Тогда речь идет о пронумерованной сети, то есть сети, вершины которой пронумерованы так, что для любой дуги (P_i, P_j) имеет место $i < j$.

Если известна продолжительность каждой работы t_{ij} , то для каждого пути может быть вычислена его длина (продолжительность) $t(L)$. Длина каждого пути равна сумме продолжительностей составляющих его работ.

Пусть весь комплекс работ уже изображен в виде пронумерованного сетевого графика, и пусть для каждой работы (P_i, P_j) задана продолжительность $t_{ij} \geq 0$ ее выполнения, которую считаем длиной этой работы (дуги). Тогда под длиной пути $(P_i, P_{j_1}), (P_{j_1}, P_{j_2}), \dots, (P_{j_k}, P_j)$ из P_i и P_j следует понимать продолжительность выполнения всей последовательности работ, составляющих этот путь, то есть число $t_{ij_1} + t_{ij_2} + \dots + t_{i_k j}$.

Оптимизация сетевого графика – это процесс совершенствования (или улучшения) организации выполнения комплекса проектных или сборочных работ, с учетом срока их выполнения. Он (процесс) проводится с целью оптимизации (улучшения – сокращения) длины (L) критического пути, выравнивания коэффициентов напряженности работ, рационального использования ресурсов. Задачи оптимизации сетевого графика возникают также при стремлении минимизировать стоимость (трудоемкость) всего комплекса проектных или сборочных работ за счет увеличения продолжительности выполнения некоторых работ при заданном времени осуществления всего проекта (от проектирования и изготовления до вывода самолета на взлетную полосу аэродрома).

При машинных расчетах обычно предполагается, что прямые затраты C_{ij} на выполнение каждой работы (P_i, P_j) убывают с возрастанием продолжительности t_{ij} ее выполнения.

Рассмотрим задачу минимизации стоимости, всего проекта (от проектирования до выкатки самолета из цеха окончательной сборки) при фиксированной его продолжительности, то есть

$$t_{ij}^{(np)} = T_{изг}^{(1)} \text{ или } C_{lim} \geq \sum_1 C_{факт} \text{ и т.д.}$$

Здесь ставится задача построения оптимального безрезервного плана выполнения проекта.

Резерв – это количество времени, которым располагаем для увеличения продолжительности выполнения работы (P_i, P_j) (если, конечно, это допустимо характером работы или проекта) без увеличения времени T_n выполнения проекта.

Пусть для данного проекта с заданными продолжительностями $t_{ij} = d_{ij}$ выполнения работ (P_i, P_j) вычислены минимальные и максимальные количества времени ($T_j^{(0)}$ и $T_j^{(1)}$) наступления событий P_j , и определены критические и некритические работы. Пусть, кроме того, зависимость стоимости C_{ij} прямых затрат на выполнение каждой работы (P_i, P_j) от ее продолжительности t_{ij} задается формулой

$$C_{ij} = -a_{ij}t_{ij} + b_{ij},$$

где $(a_{ij} \geq 0, b_{ij} > 0)$ – линейный вариант или

$$C_{ij} = \frac{a_{ij}}{t_{ij}},$$

где $a_{ij} > 0$ – выпуклый вариант.

Здесь предполагается, что по характеру некритической работы допустимо увеличение продолжительности ее выполнения за счет использования этого резерва времени, что, естественно, уменьшает ее стоимость.

Тогда возникает задача, когда при найденном критическом времени использовать резервы для некритических работ так, чтобы получить оптимальный план, то есть план, минимизирующий стоимость (или трудоемкость) всего комплекса работ по созданию самолета.

Для математической формулировки задачи необходимо априори выяснить некоторые особенности оптимального плана.

В оптимальном плане продолжительность каждой работы должна достигать наибольшего возможного значения, то есть каждая работа должна стать критической. Поэтому, считая неизвестными величинами времени T_j наступления событий P_j ($j=0,1,2,\dots,n$), резюмируем, что в оптимальном плане продолжительность каждой работы (P_i, P_j) должна быть

$$t_{ij} = (T_j - T_i).$$

Так как здесь рассматривается задача отыскания оптимального плана при заранее найденном критическом времени и критических путях, то времена наступления событий, лежащих на известных критических путях, фиксированы. Следовательно, можно считать фиксированными и продолжительности работ (P_i, P_j) , оба конца P_i и P_j которых лежат на критических путях. Множество событий P_j , лежащих на критических путях, обозначим через K (где,

$P_0 \in K, P_n \in K$), а множество работ (P_i, P_j) , у которых, по крайней мере, один конец не принадлежит множеству K , то есть не лежит ни на одном критическом пути – обозначим через R .

Сформулируем приведенный выше пример через минимум функции на основе методологии ФСИ так:

$$Z = \sum_{(P_i, P_j) \in R} [-a_{ij}(T_j - T_i) + b_{ij}],$$

где $(a_{ij} \geq 0, b_{ij} > 0)$ – линейный вариант или

$$Z = \sum_{(P_i, P_j) \in R} \frac{a_{ij}}{T_j - T_i},$$

где $a_{ij} \geq 0$ – выпуклый вариант при ограничениях $T_j - T_i \geq d_{ij}$ для всех $(P_i, P_j) \in R$, $T_j = T_j^{(0)} = T_j^{(1)}$ для всех $P_j \in K$ }

где d_{ij} – жесткое ограничение (действие) продолжительности работы. Здесь необходимо отметить, что $d_{ij} > 0$ – строго, то есть d_{ij} – только положительно.

Здесь предполагается, что при заданных продолжительностях d_{ij} выполнения работ (P_i, P_j) вычислено критическое время $T_{кр}$ проекта и найдены все критические пути. Поэтому в рассматриваемом примере, оптимальный план является минимальным по стоимости (трудоемкости) лишь среди всех планов, выполняемых за время $T_{кр}$, то есть выполняемых за минимально допустимое для этого проекта время. Очевидно, минимальная стоимость проекта снизится, если удлинить время T его выполнения, так как тогда возможно увеличение продолжительности любой проектной или сборочной работы. Здесь время T выполнения проекта больше, чем $T_{кр}$, тогда оптимальный план отыскивается во множестве планов, более широком, чем в рассмотренном примере (когда $T = T_{кр}$), то есть через минимум функции при условии, что стоимость (трудоемкость) оптимального плана будет ниже, чем при $T = T_{кр}$.

Сформулируем математическую интерпретацию этой задачи через минимум функции на основе методологии функционально-стоимостной инженерии, то есть

$$Z = T_n$$

при ограничениях

$$\left. \begin{aligned} T_j - T_i - t_{ij} &\geq 0 \text{ для всех } (P_i, P_j) \\ 0 \leq d_{ij} \leq t_{ij} \leq D_{ij} &\text{ для всех } (P_i, P_j) \end{aligned} \right\}$$

где d_{ij} – ограничение (действие) продолжительности работы снизу,

D_{ij} – ограничение (общие действия) продолжительности работы сверху.

Запишем сумму (совместных работ) в виде

$$\sum_{(P_i, P_j)} (-a_{ij}t_{ij} + b_{ij}) \leq C_{\text{lim}} \text{ – линейный вариант}$$

или

$$\sum_{ij=0}^n \frac{a_{ij}}{t_{ij}} \leq C_{\text{lim}} - \text{выпуклый вариант,}$$

где C_{lim} – стоимость ресурсов при лимите средств или трудоемкости разработок.

Следовательно, задача для линейного варианта – задача линейного программирования, задача для выпуклой функции – задача выпуклого программирования.

Если положить $t_{ij} = D_{ij}$ и найти соответствующую стоимость проекта C_M , то при $C_{\text{lim}} < C_{\text{max}}$ задача, очевидно, неразрешима, то есть всегда на практике должно выполняться соотношение:

$$C_{\text{lim}} \geq \sum_1 C_{\text{max}},$$

где $\sum_1 C_{\text{max}}$ – это сумма максимальных суммарных расходов при фактической реализации проекта по выпуску изделий (самолетов и др. высокотехнологической техники).

Если же положить $T_n = m$, где m – жесткое ограничение по ресурсам для критического времени, и найти соответствующую максимальную стоимость C_{max} проекта (или трудоемкость), то при $C \geq C_{\text{max}} \cdot \bar{Z} = m = T_n$ будет минимальным временем (или трудоемкостью), где C_{max} – то же, что в формуле, а \bar{Z} – средняя значимость работ с позиции ФСИ. Здесь линейный и выпуклый кусочно-линейный вариант этой задачи решается алгоритмом Келли, что не рассматривается в рамках данной статьи.

Сетевая модель может быть интерпретирована в виде математической модели, то есть априорного машинного представления всего проекта в целом, что позволяет использовать автоматизированные системы для:

- расчета продолжительности и затрат всех видов ресурсов общего цикла создания самолета и его отдельных агрегатов,
- прогнозирования видов, направлений и последствий воздействия факторов внутренней и внешней среды, имеющих значимость в достижении заданного качества процессов сборки,
- оптимизации в условиях заданных ограничений и целей имеющейся модели для придания,
- для придания помехоустойчивости, то есть робастности проектируемым процессам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веревичев И.И., Маркова Е.В., Поташкова Н.Н. Проблемы оценки экономического потенциала авиационных компаний // *Фундаментальные исследования*. 2016. № 7-2. С. 314-318.
2. Попов П.М., Ляшко Ф.Е., Рыжаков С.Г. Графоаналитические методы и процедуры моделирования

параметров технологических процессов производства гнутолистовых профилей по технологическим переходам // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2011. Т. 13. № 4-2. С. 431-439.

3. Ляшко Ф.Е., Тлустенко С.Ф. Косвенные методы топологического описания технологических комплексов // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2006. № 4. С. 104-109.
4. Ляшко Ф.Е. Методика проведения расчетов экономической эффективности работы сборочного производства самолетов на основе математического моделирования процессов в САПР, АСУТП, АСТПП комплексной АСУП // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2008. № 2. С. 34-39.
5. Ляшко Ф.Е., Манеева Ю.Р. Модельные представления обрабатывающих технологических операций // В сборнике: *Актуальные проблемы развития социально-экономических систем*. 2016. С. 370-375.
6. Ляшко Ф.Е., Попов П.М. Организация производства сборки фюзеляжа самолета на основе алгоритмизации проектно-технических процедур и технологических процессов // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2008. № 2. С. 95-106.
7. Маркова Е.В. Из истории налимовского «незримого коллектива» (о математической теории эксперимента в 1970-1980-х годах) // *Науковедение*. 2001. № 4. С. 170.
8. Маркова Е.В. Инновационный потенциал наукоемкого предприятия авиационного космического комплекса // *Вестник Самарского муниципального института управления*. 2014. Т. 16. № 6-2. С. 501.
9. Соколова О.Ф. Разработка методов и средств информатизации организации производственных процессов сборки самолетов: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.12; защищена 28.06.05. Ульяновск, 2005. 151 с.
10. Тиц С.Н., Коптев А.Н., Ляшко Ф.Е. Состояние и проблемы практического применения методов неразрушающего контроля планеров воздушных судов // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2007. Спец. вып. Т. 2. С. 164-168.
11. Чоракаев О.Э., Соснин П.И. Концептуальное экспериментирование в проектировании конфигурируемых шаблонов авиационных деталей // *Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем (OSTIS-2015)*. Материалы V международной научно-технической конференции: Электронный ресурс. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Государственное учреждение «Администрация Парка высоких технологий». 2015. С. 373-380.
12. Чоракаев О.Э. Модель математической оценки эффективности мероприятий над эргатической системой на примере процесса разработки элементов технологического оснащения авиационных изделий // *Известия Самарского научного центра*

- Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 4(4). С. 876-879.
13. Щеклеин В.С., Чоракаев О.Э. Подход к математическому моделированию производства на авиационном предприятии на основе развития метода сетевого планирования управления // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 4(3). С. 874-877.

GIVING THE ROBUSTNESS TO AIRCRAFT ASSEMBLY PROCESSES

© 2017 O.F. Sokolova, F.E. Liashko, M.I. Sokolova

Institute of Aviation Technology and Management of Ulyanovsk State Technical University

This article focuses on the possibility of giving the robustness to aircraft assembly processes by the functionally-cost analysis with necessary using and automation of the network planning starting with design phase.

Keywords: aircraft assembly processes, robustness, functionally-cost analysis, network planning.

Olga Sokolova, Candidate of Technics, Associate Professor.

E-mail: sokof1407@rambler.ru.

Fedor Liashko, Doctor of Technics, Professor.

E-mail: lyashkofed@rambler.ru

Margarita Sokolova, Student, Specialty "Information Systems and Technologies". E-mail: sokof1407@rambler.ru