

УДК 004.942

## ИМИТАЦИОННАЯ ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНАЯ СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА РАЗРАБОТКИ И СОГЛАСОВАНИЯ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ НА АВИАСТРОИТЕЛЬНОМ ПРЕДПРИЯТИИ

© 2014 Ю.В. Полянсков, А.А. Бутов, О.В. Железнов

Ульяновский государственный университет

Поступила в редакцию 01.09.2014

Проведен анализ процесса разработки и согласования конструкторско-технологической документации в рамках бизнес-процесса конструкторско-технологической подготовки производства авиастроительного предприятия, сформулирована его математическая модель в терминах системы массового обслуживания и разработана имитационная модель с модифицированным алгоритмом оптимизации OptQuest в программной среде AnyLogic.

Ключевые слова: *имитационная модель, управление потоками работ, распределенная эволюционная сеть, многокритериальная оптимизационная задача*

Создание сложной наукоёмкой продукции требует координации разнообразных процессов, и задержка на одном участке ведет к срыву сроков на других. Удлинение полного цикла проектирования и производства продукции, включающего предпроектные исследования, конструкторско-технологическую подготовку производства (КТПП), материально-техническое снабжение, собственно производство, негативно сказывается на положении предприятия как вследствие потери гибкости и конкурентоспособности, невыполнения требований заказчиков, так и в результате снижения экономической эффективности. В связи с этим необходимо выявление и устранение основных причин, определяющих увеличение длительности производственного цикла.

Проведено исследование относительной частоты возникновения задержки изготовления нового воздушного судна вследствие различных факторов. Результаты анализа показали, что в 63% всех случаев причиной является несвоевременный запуск в производство конструкторско-технологической документации (КТД). Этап разработки и согласования КТД является одной из наиболее продолжительных и затратных стадий полного цикла создания новой продукции и

составляет 25-35% трудоемкости. Процесс управления разработкой и согласованием КТД оказывает существенное влияние на продолжительность производственного цикла изделия. Процесс управления подразумевает функции планирования, распределения и контроля над выполнением рассматриваемого процесса.

Начиная с 70-х годов прошлого века основной систем автоматизированного управления производством послужили задачи оптимизации [1], в первую очередь теория расписаний, получившая развитие, начиная с работ Конвея и Максвелла [2]. В связи с выявленными трудностями решения NP-полных задач были разработаны квазиоптимальные методы решения подобных задач, среди которых генетические алгоритмы, нейронные сети, метод отжига, алгоритм «муравьиных колоний» и др. [3].

**Цель работы:** разработка математической модели оценки достаточности ресурсов процесса разработки и согласования КТД в рамках бизнес-процесса КТПП авиастроительного предприятия.

С математической точки зрения это задача определения плановых сроков и их сдвигов, а также распределения работ, то есть составления расписания. Составление расписаний, в особенности на оперативном уровне, является одной из наиболее сложных задач, поскольку размерность задачи значительна, количество возмущающих случайных факторов очень велико, а многие из них не поддаются учёту. Для труда конструкторов и технологов рассмотренная ситуация осложняется тем, что творческая деятельность в меньшей степени планируется и нормируется,

*Полянсков Юрий Вячеславович, доктор технических наук, профессор, президент. E-mail: polyan-skovyuv@gmail.com*

*Бутов Александр Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики. E-mail: pt@ulsu.ru, butov@mv.ru*

*Железнов Олег Владимирович, заместитель директора НИЦ CALS-технологий, E-mail: olegulsu@mail.ru*

что вызывает проблемы с её формализованным описанием. Поставлена задача разработки имитационной дискретно-событийной стохастической модели процесса разработки и согласования КТД в терминах систем массового обслуживания (СМО). Важной задачей над имитационной моделью является выполнение оптимизационного эксперимента, в результате которого находятся Парето-оптимальные решения целевой функции математической модели.

**Математическая модель оценки достаточности ресурсов процесса разработки и согласования КТД.** Процесс разработки и согласования КТД представляет собой строгую

последовательность определенных действий УГК и УГТ согласно действующим ГОСТам, СТП предприятия и план-графику. Основная IDEF0 схема процесса разработки и согласования КТД представлена на рис. 1. На вход процесса поступают чертежи детали (сборочной единицы), электронная модель детали, информация об изменениях КД. В ходе процесса разрабатывается следующая КТД: технологическая инструкция, маршрутная карта, карта технологического процесса, операционная карта, комплекточная карта, ведомость подготовки производства, ведомость плазово-шаблонной оснастки.

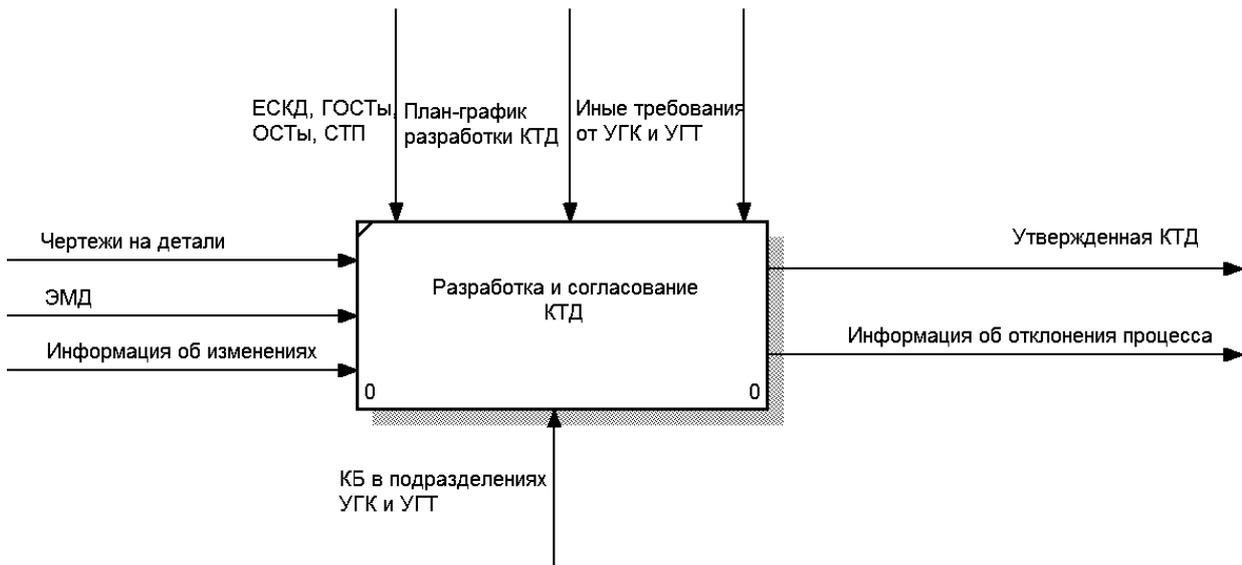


Рис. 1. Схема процесса разработки и согласования КТД

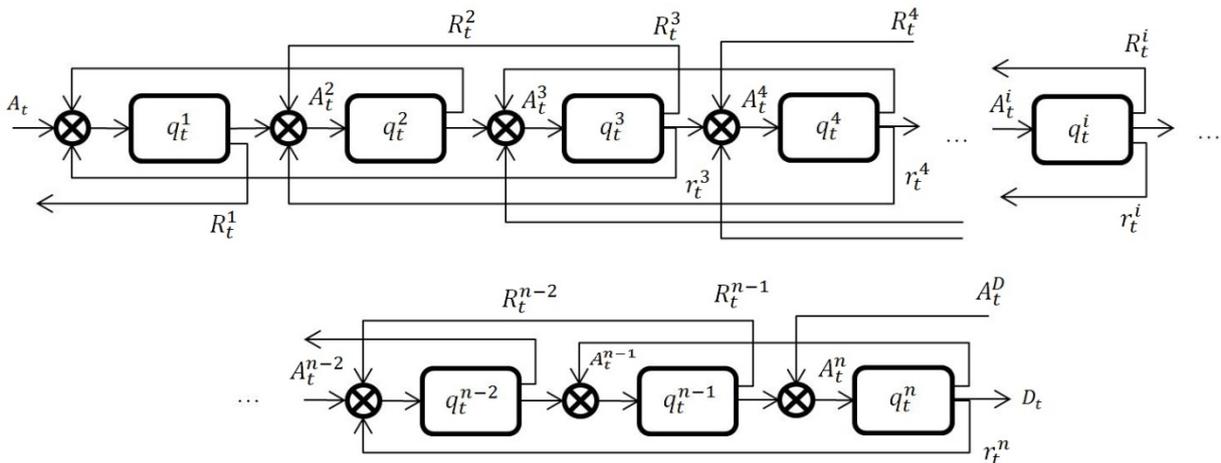


Рис. 2. Схема СМО для процесса разработки и согласования КТД

Пусть есть некий объем КД, который поступает из внешнего конструкторского бюро в отдел УГК авиационного предприятия. При выполнении бизнес-процесса КТПП данный объем КД прорабатывается и в результате

разрабатывается конструкторско-технологическая документация для изготовления детали на самолет. Наша задача состоит в том, чтобы в режиме реального времени проводить мониторинг, анализ и управление процессом разработки и

согласования КТД, сравнивать значения управляемых показателей с найденными оптимальными значениями и находить «узкие места» процесса для управления (отделы КТПП по вине которых произошли отклонения фактических от планируемых показателей). Приведено формальное математическое описание модели для процесса «Разработка и согласование КТД» [4]. Рассмотрим данный бизнес-процесс в виде схемы узлов системы массового обслуживания (рис. 2).

Считаем, что комплект КТД состоит из конечного числа документов и электронных моделей деталей, тогда считающий процесс числа единиц поступившей КД в  $i$ -й отдел КТПП будет иметь вид:

$$A^i = (A_t^i)_{t \geq 0} \quad (1)$$

Считающий процесс числа единиц обрабатываемой КТД в  $i$ -м отделе КТПП будет иметь вид:

$$q^i = (q_t^i)_{t \geq 0} \quad (2)$$

Считающий процесс числа единиц полностью проработанной КТД в  $i$ -м отделе КТПП будет иметь вид:

$$D^i = (D_t^i)_{t \geq 0} \quad (3)$$

Считающий процесс числа возвращаемой на доработку КТД из  $i$ -го в  $i-1$  отдел будет иметь вид:

$$R^i = (R_t^i)_{t \geq 0} \quad (4)$$

Считающий процесс числа возвращаемой на доработку КТД из  $i$ -го в  $i-2$  отдел будет иметь вид:

$$r^i = (r_t^i)_{t \geq 0} \quad (5)$$

Для балансовых соотношений составлены уравнения считающего процесса числа поступившей и количество обрабатываемой КТД в  $i$ -м отделе.

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda + \left(1 - \frac{T^{(2)}}{T}\right) \cdot \alpha^2 \cdot N^2 + \left(1 - \frac{T^{(3)}}{T}\right) \cdot \alpha^3 \cdot N^3 - \\ - \left(1 - \frac{T^{(1)}}{T}\right) \cdot \alpha^1 \cdot N^1 - \left(1 - \frac{T^{(1)}}{T}\right) \cdot R^1 = 0 \\ \left(1 - \frac{T^{(1)}}{T}\right) \cdot \alpha^1 \cdot N^1 + \left(1 - \frac{T^{(3)}}{T}\right) \cdot R^3 + \left(1 - \frac{T^{(4)}}{T}\right) \cdot r^4 - \\ - \left(1 - \frac{T^{(2)}}{T}\right) \cdot \alpha^2 \cdot N^2 - \left(1 - \frac{T^{(2)}}{T}\right) \cdot R^2 = 0 \\ \dots \\ \left(1 - \frac{T^{(i-1)}}{T}\right) \cdot \alpha^{i-1} \cdot N^{i-1} + \left(1 - \frac{T^{(i+1)}}{T}\right) \cdot R^{i+1} + \left(1 - \frac{T^{(i+2)}}{T}\right) \cdot r^{i+2} - \\ - \left(1 - \frac{T^{(i)}}{T}\right) \cdot \alpha^i \cdot N^i - \left(1 - \frac{T^{(i)}}{T}\right) \cdot R^i - \left(1 - \frac{T^{(i)}}{T}\right) \cdot r^i = 0 \end{array} \right. \quad (6)$$

Считаем, что интенсивность поступления КД от внешнего КБ имеет распределение по закону Пуассона с функцией распределения времени между моментами поступления документации  $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ . Оптимизационная задача формулируется следующим образом: необходимо определить количество сотрудников с учетом

должностных (функциональных) ролей, обеспечивающих наилучшую динамику выпуска КТД с учетом минимизации двух целевых критериев: объема возвращаемой на доработку КТД и затрат на оплату труда сотрудникам КТПП, тогда целевая функция  $\Phi_1$  математической модели будет иметь вид:

$$\Phi_1(N^1, \dots, N^n) = \left\{ \left(1 - \frac{T^{(n)}}{T}\right) \cdot \alpha^n \cdot N^n \right\} - \left\{ \sum_{i=1}^n T^i \cdot N^i \right\} \cdot A \rightarrow \max_{n_1, \dots, n_n} \bar{D}_t^i \quad (7)$$

при условии, что  $N_1 + N_2 + \dots + N_n = \bar{N}$ , при  $A \ll 1$ , где  $T^{(n)}$  – время простоя  $n$ -го отдела;  $T$  – общее время эксперимента;  $N^n$  – количество сотрудников в  $n$ -м отделе;  $T^i$  – время на проработку  $i$ -го комплекта КТД;  $\alpha^n$  – коэффициент

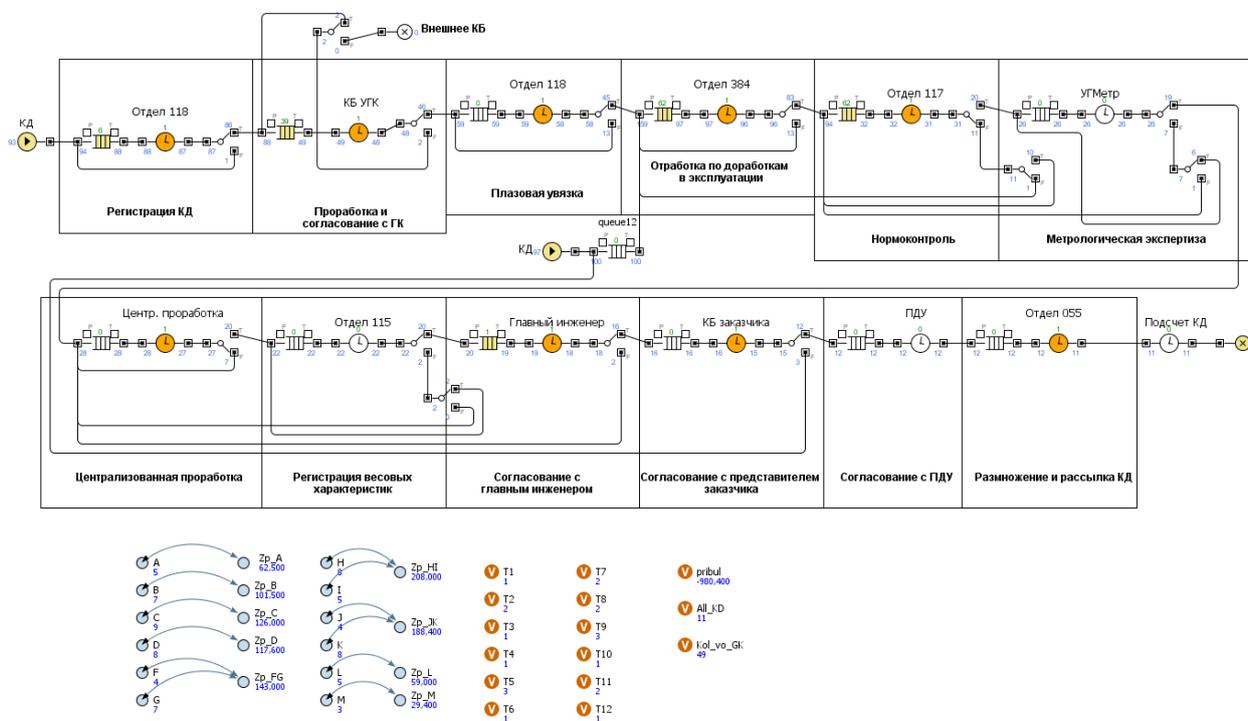
пропорциональности количества проработанной КТД и числа сотрудников  $n$ -го отдела.

Для проверки адекватности разработанной математической модели оценки достаточности ресурсов бизнес-процесса разработки и согласования КТД и проведения оптимизационных

экспериментов ее целевой функции построена имитационная модель в виде дискретно-событийной стохастической модели многофазной СМО с использованием программного продукта AnyLogic.

**Имитационная модель процесса разработки и согласования КТД.** С использованием

встроенного функционала AnyLogic разработана имитационная модель процесса разработки и согласования КТД в виде дискретно-событийной стохастической модели. В модели заданы узлы в виде отделов КТПП, вероятностные переходы и связи между узлами (рис. 3).



**Рис. 3.** Имитационная модель процесса разработки и согласования КТД

На имитационную модель накладываются следующие ограничения:

- номенклатура включает 4 вида изделий;
- 12 отделов КТПП по разработке КТД;
- 280 сотрудников;
- 12 должностных (функциональных) ролей для сотрудников;
- 2 CAD/CAM/CAE системы;
- работа строится в 2 смены;
- ведется разработка и согласование 11 видов КТД;
- 2 вида производства (единичное и серийное).

Важно отметить, что взаимосвязь между основными объектами модели является «много-много» - другими словами, для разработки одного вида КТД (например, электронной технологической модели) может использоваться несколько видов CAD/CAM/CAE систем и одна CAD/CAM/CAE система может быть использована для нескольких видов КТД. В результате переменные рассматриваемой модели являются многомерными, что порождает многомерное пространство поиска решений и повышает вычислительную сложность оптимизационной задачи. В результате строится граница Парето,

которую образуют недоминируемые Парето-решения. Другими словами, остальные решения не позволяют добиться одновременно более низких значений объема возвращаемой на доработку КТД и затрат на оплату труда сотрудникам КТПП. Следует отметить, что все слагаемые в формуле целевой функции имеют связь между собой, установленную через отношения внутри модели. Так, например, заложенные функции спроса, издержек и производства позволяют найти оптимальный баланс между планом выпуска КТД и планом разработки с учетом производственных ограничений.

Так как целевая функция порождает многомерное пространство поиска решений, вычислительная сложность оптимизационной задачи становится преградой к ее решению за доступное время. Встроенного функционала в AnyLogic недостаточно для решения поставленной оптимизационной задачи, поэтому рассматриваемая имитационная модель была интегрирована с разработанной распределенной эволюционной сетью с использованием технологии IntelIJ IDEA на языке программирования Java. В результате, формирование фронта Парето заняло

всего 2 минуты. При этом каждый из вычислительных процессов произвел 670 итераций вычисления целевой функции рассматриваемой имитационной модели. Таким образом, система обеспечила решение поставленной многокритериальной задачи за допустимое время.

**Выводы:** описан процесс разработки и согласования КТД КТПП авиастроительного предприятия, разработана математическая модель оценки достаточности ресурсов для планового функционирования рассматриваемого процесса. Разработана имитационная модель процесса разработки и согласования КТД с использованием программного продукта AnyLogic в виде дискретно-событийной стохастической модели. Предложен и реализован подход к решению многокритериальных оптимизационных задач большой размерности на основе алгоритма OptQuest в программном продукте AnyLogic. Разработана программа на языке

программирования Java, интегрированная в имитационную модель AnyLogic.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Моисеев, И.Н.* Математика ставит эксперимент. М., Наука, 1975. 226 с.
2. *Конвей, Р.В.* Теория расписаний / *Р.В. Конвей, В.Л. Максвелл, Л.В. Миллер.* – М., Наука, 1975. 359 с.
3. *Goldberg, D.E.* Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. – Addison-Wesley, Reading, MA, 1989. Дата обращения: 30.08.2014 <http://www.amazon.com/Genetic-Algorithms-Optimization-Machine-Learning/dp/0201157675>
4. *Железнов, О.В.* Численные расчеты по математической модели оценивания вероятности возникновения сбоя функционирования бизнес-процесса КТПП авиастроительного предприятия / *О.В. Железнов, Ю.В. Полянсков* / Известия Самарского научного центра РАН. Т. 15, 2013. № 4(4). С. 854-859.

## SIMULATION OF DISCRETE-EVENT STOCHASTIC PROCESS MODEL DEVELOPMENT AND COORDINATION OF DESIGN AND TECHNOLOGICAL DOCUMENTATION FOR THE AIRCRAFT MANUFACTURING COMPANY

© 2014 Yu.V. Polyanskov, A.A. Butov, O.V. Zheleznov

Uliyanovsk State University

The analysis of the development and coordination of design documentation within the business process design and technological preparation of production aircraft manufacturer, its mathematical model is formulated in terms of a queuing system and developed a simulation model with a modified OptQuest optimization algorithm in a software environment AnyLogic.

*Key words: simulation model, workflow management, distributed evolutionary network multicriteria optimization problem*

---

*Yuriy Polyanskov, Doctor of technical Sciences, Professor, President.*

*E-mail: polyanskovyuv@gmail.com*

*Alexander Butov, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head of the Applied Mathematics Department. E-mail: pm@ulsu.ru, butov@mv.ru*

*Oleg Zheleznov, Deputy Director of SRC of CALS-Technologies. E-mail: olegulsu@mail.ru*