

МОДЕЛИ ОЦЕНКИ УСКОРЕНИЯ ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИХ РАБОТ В НАУКОЁМКОМ МАШИНОСТРОЕНИИ ЗА СЧЁТ РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЯ ИТЕРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ РАЗРАБОТКИ

© 2010 В. А. Комаров¹, М. Е. Кременецкая¹, А. В. Соллогуб², А. Н. Филатов²

¹Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)
²ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», г. Самара

Предложена модель оценки ускорения проектно-конструкторских работ при их распараллеливании с учётом затрат на координацию и итерации. Рассмотрены различные стратегии ведения проектно-конструкторских работ по технологии нисходящего проектирования с оценкой их влияния на ускорение. Показаны пути использования модели для оптимизации процесса управления проектированием и структуры проектной организации.

Проектирование, моделирование, распараллеливание, итерации, ускорение, информационные технологии.

Введение

Известно, что от замысла до реализации такой сложной наукоёмкой техники, как ракеты, космические аппараты, самолёты, двигатели и т.п. проходит пять-десять и более лет. Поэтому одной из важнейших задач совершенствования процесса проектирования следует считать сокращение его времени.

Вопрос со сроками и качеством проектирования стоит настолько остро, что сейчас происходит практически смена проектных парадигм. На смену «эволюционному» проектированию, которое в большой мере использует статистические данные по ранее построенным изделиям, весьма упрощённые расчетные зависимости и длительный цикл испытаний и доводок, сейчас приходит новая технология, которую можно назвать «технологией точного попадания». В англоязычной литературе она называется «concurrent design» [1, 2, 3].

Ключевым моментом в этой технологии является использование высокоточного математического моделирования на ранних стадиях про-

ектирования. Однако разработка адекватных моделей – достаточно трудоёмкий процесс, и поэтому одним из путей ускорения проектных работ является их распараллеливание. Этим целям, в частности, служит так называемое «нисходящее проектирование», активно внедряемое в «ЦСКБ-Прогресс» [4].

Процесс разработки проектов характерен тем, что ранние стадии проекта отличаются от последующих большей степенью неопределённости, разнообразием вариантов реализации, количеством возможных альтернатив, большей энтропией (хаотичностью, неупорядоченностью, большим количеством ошибок и изменений). При подходе к стадиям создания физического прототипа, то есть к началу производства изделия, неопределённость, количество вариантов и альтернатив, а вместе с ними и число ошибок и изменений, должно сводиться к минимуму.

Несмотря на все известные достижения в математическом моделировании, создание сложного технического проекта происходит в виде последовательных итераций, при которых наблюдаются неоднократные возвраты и частичное повторение выполнения предыдущих стадий. Большая часть изменений, влияющих на качество проектно-конструкторских работ, связана с челове-

ским фактором (ошибки разработчиков и заказчиков проекта, изменение исходных данных на проектирование, появление новых технологий и др.). В процессе разработки проекту приходится преодолевать некоторые «ворота качества», прохождение через которые сопровождается проверкой его на выполнение определённых критериев. Невыполнение этих критериев приводит к возврату разработки на предыдущие стадии.

«Ворота качества» в концептуальном плане строятся:

- при разработке и оценке концепции проекта;
- при оценке возможности реализации с точки зрения достижения требуемых целевых показателей эффективности;
- при оценке соответствия требованиям технико-экономического обоснования;
- при возможности реализации проекта с позиций технологичности, производственных мощностей, организации серийного производства.

Согласно новым технологиям вся информация (модели, чертежи, документация и т.д.), сформированная на различных стадиях проектирования, должна поступать, храниться и обрабатываться в едином информационном пространстве предприятия, в рамках которого и реализуется распараллеливание работ. Итерационный процесс разработки проекта находит отражение в изменении объёмов хранимой и обрабатываемой информации. Поток транзакций, обновляющие и дополняющие проект (сеть конструкторско-технологических знаний), позволяют генерировать большее количество исполнений, динамику которых можно описать в виде затухающего колебательного процесса:

$$I_i(t) = A_{0i} \cdot e^{-k_i t} \cdot \sin(\omega_{0i} t + \varphi_{0i}) + F_i, \quad (1)$$

где:

$I = (I_1, I_2, \dots, I_i, I_N)^T$ – N -мерный вектор, отражающий количество тран-

закций для соответствующих выполняемых проектов в качестве своих компонентов. В качестве эквивалентного исполнения I_i понимается i -й комплект (из общего числа N) конструкторско-технологической документации, направляемый на производство;

A_{0i} – максимальное количество эквивалентных исполнений, полученных при разработке проекта;

k_i – показатель инертности процесса проектирования, характеризующий реакцию единого информационного пространства на изменения объёма конструкторско-технологической документации, а также на инновационные решения (появление новых знаний или выявление закономерностей);

ω_{0i} – показатель апробированности решений, который характеризует количество итераций при разработке проекта изделия;

t – время разработки проектно-конструкторской документации;

φ_{0i} – начальная фаза колебаний исполнений, то есть фаза колебаний в начальный момент времени $t = 0$;

F_i – результаты деятельности конструкторско-технологической подготовки (документы, модели, чертежи и т.п.).

Процесс изменения количества исполнений имеет вид, приведённый на рис. 1.

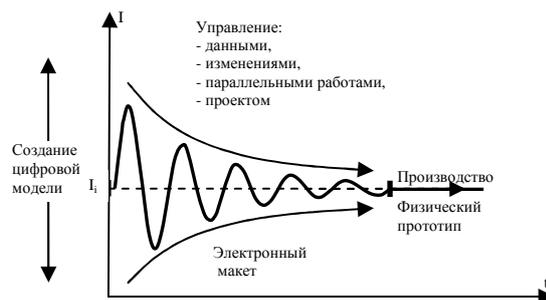


Рис. 1. Снижение неопределённости проекта к началу производства

Данная модель основана на сетевом представлении результатов конструкторско-технологической подготовки производства, эволюция которой производится в виде осциллирующей реакции (1) на появление новых проектных данных [5, 6, 7].

Таким образом, задача сокращения времени на разработку проекта за счёт распарал-

леливания работ и снижения количества итераций является актуальной. Следует отметить, что координация параллельно выполняемых работ, а также исправление допущенных ошибок предполагают затраты (потери) времени и других ресурсов.

С учётом изложенного рассмотрим модель ускорения проектно - конструкторских работ, учитывающую эти затраты.

Итерационная модель определения коэффициента ускорения проектно - конструкторских работ с учётом возможности исправления ошибок

Распараллеливание проектно-конструкторских работ в значительной мере повышает скорость их выполнения. Однако специфика процесса проектирования заключается в совмещении последовательно и параллельно выполняемых работ.

Оценить ускорение работ при таком подходе в организации труда позволяет закон Амдала, представляющий теоретическую основу оценок достижимой производительности параллельных работ [8].

Величина ускорения рассчитывается следующим образом:

$$S_p^{(j)} = \frac{1}{\left(\alpha + \frac{1-\alpha}{p}\right) \left(1 + \sum_{v=0}^j \varepsilon_v\right)} \quad (2)$$

Здесь:

α – доля работ из всего объёма, которая выполняется последовательно;

$(1 - \alpha)$ – доля работ, которая может быть распараллелена;

p – количество параллельно работающих подразделений;

j – количество итераций, каждая из которых уточняет проект за счёт исправления ошибок, допущенных на предыдущих итерациях;

v – конечное число итераций;

γ – коэффициент, определяющий долю работы, которую необходимо дополнительно затратить на ко-

ординацию параллельных работ и согласование результатов после v - й итерации проекта. Определяется по формуле $\varepsilon_v = \gamma \cdot e^{-\gamma v}$, где γ – коэффициент уменьшения доли работ на координацию с увеличением номера итерации; γ_0 – коэффициент, определяющий ту долю работы, которую необходимо дополнительно затратить, чтобы исправить ошибки, допущенные после первой реализации проекта;

$S_p^{(j)}$ – суммарное ускорение решения проектно-конструкторской задачи в результате ряда итераций (j) по уточнению проекта. Эта характеристика выражает отношение времени решения определённой задачи при последовательном выполнении работ ко времени её решения с распараллеливанием работ и с учётом затрат на его реализацию.

В качестве примера приведём результаты вычисления ускорения для следующих исходных данных:

$$\alpha = 0,2, p = 4; \gamma_0 = 0,1; j = 0, \dots, 5; \gamma = 1.$$

В результате для шести итераций получаем следующие значения:

$$S_p^{(j)} = (2,273; 2,199; 2,173; 2,164; 2,161; 2,159).$$

График изменения ускорения при распараллеливании работ в зависимости от числа итераций приведён на рис. 2.

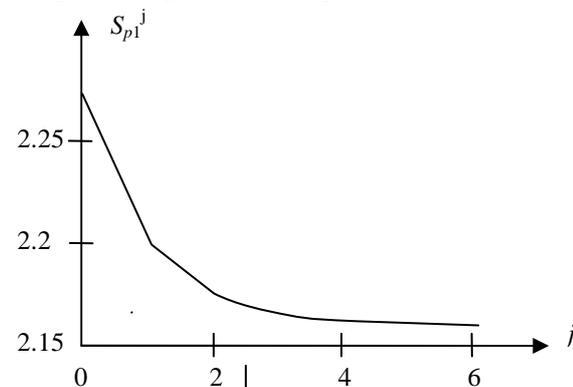


Рис.2. График изменения ускорения

Доля потерь из-за допущенных ошибок на каждой итерации определяется по формуле

$$P^{(j)} = 1 + \sum_{v=0}^j \varepsilon_v \quad (3)$$

где $\varepsilon_v = \gamma \cdot e^{-\gamma v}$,

и соответственно равны:

$$P^{(j)} = (1,1; 1,137; 1,15; 1,155; 1,157; 1,158).$$

Из полученных значений следует, что доли потерь трудоёмкости нарастающим ито-

гом с каждой итерацией увеличиваются, ускорение соответственно уменьшается, но с увеличением количества итераций этот процесс стабилизируется.

Предложенная итерационная модель позволяет учитывать доли выполняемых последовательных и параллельных работ. Таким образом, можно изменять ускорение проектно-конструкторских работ, меняя их организацию.

Оценка влияния стратегии организации работ на ускорение процесса проектирования по нисходящей технологии

Проектные проработки, включающие создание единой мастер-геометрии и управляющей структуры создаваемого изделия, как правило, осуществляются в одном проектном подразделении и представляют собой последовательный процесс, результатом которого является построение проектного облика изделия и формирование требований к нему.

Разработка же конструкторской документации, для которой уже определены геометрические ограничения и необходимые технические требования, может осуществляться в параллельном режиме в нескольких конструкторских подразделениях, что обусловлено базовыми принципами нисходящего проектирования – наследованием геометрии верхнего уровня, системой сквозных ссылок и ассоциативностью геометрических данных.

Существующая возможность распараллеливания процессов разработки конструкторской документации приводит к появлению различных подходов к стратегии проектно-конструкторских работ, различающихся степенью распределения параллельно и последовательно выполняемых работ.

Первая из стратегий состоит в том, что мастер-геометрия изделия

разрабатывается с высокой степенью конструкторской детализации, которая, с одной стороны, увеличивает долю последовательно выполняемого объёма работ и, соответственно, уменьшает долю работ, которая может выполняться в параллельном режиме, а с другой – сильно ограничивает возможности конструкторов для воплощения своих конструкторских идей. В итоге может возникнуть ситуация, когда результаты детальной конструкторской проработки будут противоречить тому, что предписывает мастер-геометрия, и реализовать её в полной мере будет невозможно. Это приведёт к необходимости полной реконфигурации мастер-геометрии.

Опыт разработки изделий по нисходящей технологии показывает, что мастер-геометрия должна содержать только необходимую информацию о геометрии изделия, то есть фактически «скульптурное» её описание, основные размеры, «следы» возможного расположения наиболее крупных элементов конструкции, области их возможного сопряжения, то есть оставлять для конструкторской проработки как можно больше степеней свободы. Такой подход наиболее предпочтителен и составляет суть второй из рассматриваемых стратегий. В этом случае сокращается доля последовательно выполняемых работ, что приводит к меньшим изменениям мастер-геометрии, к сокращению общих сроков разработки за счёт возможности параллельной организации выпуска конструкторской документации.

Для возможности расчёта стратегии организации работ по закону Амдала [8], была разработана программа, входной оператор которой имеет вид:

$$\text{Амдаль}(\alpha, p, \varepsilon_0, j, \gamma).$$

Сравним различные стратегии организации работ, варьируя значения отдельных параметров.

Произведём расчёт стратегии организации работ (Амдаль1), варьируя параметр α . Пусть A – массив значений α ; n – размерность массива A , уменьшенная на единицу; p – количество параллельно работающих подразделений, j – количество итераций реализации проекта:

$$\text{Амдаль1}(A, n, p, \varepsilon_0, j, \gamma).$$

Результатом работы программы является массив, каждый столбец которого содержит значения Sp для конкретного значения по всем итерациям.

На рис. 3 представлены результаты работы программы для следующих исходных данных:

$$p = 3, \quad \alpha = 0,1, \quad j = 4, \quad \gamma = 1,$$

$$A1 = \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0.2 \\ 0.3 \\ 0.4 \end{bmatrix}.$$

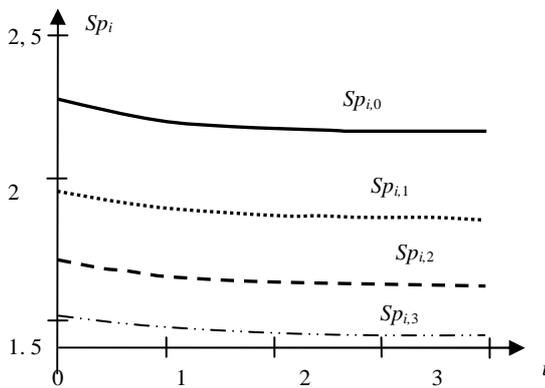


Рис. 3. Графики изменения ускорения для различных

результаты расчётов показывают, что чем меньше значение α , тем выше ускорение работ, меньше уровень детализации, больше степень свободы для конструкторских подразделений.

Произведём расчёт стратегии организации работ (Амдаль2), варьируя параметр p . Пусть P – массив значений p ; n – размерность массива P , уменьшенная на единицу; j – количество итераций реализации проекта:

$$\text{Амдаль2}(\alpha, P, n, \alpha, j, \gamma).$$

Выходной параметр – массив, каждый столбец которого содержит значения Sp для конкретного количества подразделений по всем итерациям.

На рис. 4 представлены результаты работы программы для следующих исходных данных:

$$= 0,2, \quad \alpha = 0,1, \quad j = 4, \quad \gamma = 1, \quad P1 = \begin{bmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{bmatrix}.$$

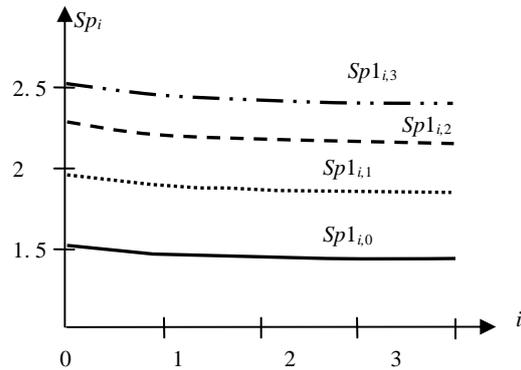


Рис. 4. Графики изменения ускорения для различных p и $\alpha = 0,2$

Для сравнения приведём график изменения ускорения (рис. 5) при других значениях исходных данных:

$$= 0,5, \quad \alpha = 0,1, \quad j = 4, \quad \gamma = 1, \quad P1 = \begin{bmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{bmatrix}.$$

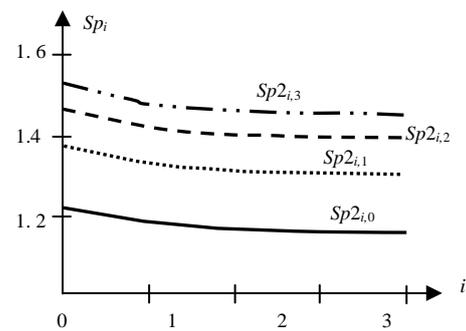


Рис. 5. Графики изменения ускорения для различных p и $\alpha = 0,5$

Анализ графиков, представленных на рис. 4 и рис. 5, показывает, что распараллеливание тем эффективнее, чем меньше значение α . При $\alpha > 0,5$ выигрыш в ускорении незначителен, а затраты на организацию параллельной работы возрастают. Исходя из этого, можно сделать вывод, что существует определенное значение последовательно выполняемых работ, при котором их распараллеливание теряет смысл.

Рассмотрим следующий пример, в котором будем учитывать технологии выполнения самих проектно-конструкторских работ и работ, направленных на улучшение технологий

по исправлению ошибок. Такими технологиями являются САПР, PDM и PLM – системы, которые дают возможность уменьшить долю затрат на координацию параллельно выполняемых работ, согласование результатов и исправление допущенных ошибок.

Каждой технологии поставим в соответствие ряд значений коэффициентов α_0 и γ . Будем полагать, что технология тем лучше, чем меньше значение коэффициента α_0 и больше значение γ . Значения коэффициентов для технологий представим в виде векторов E_0 и Υ .

Входной оператор для программы определения ускорений имеет вид:

$$\text{АмдальЗ}(\alpha_0, p, n, E_0, j, \Upsilon).$$

Проверим данное предположение для следующих исходных данных:

$$\alpha_0 = 0,3, \quad p = 3, \quad n = 4, \quad j = 4,$$

$$E_0 = \begin{bmatrix} 0.15 \\ 0.12 \\ 0.1 \\ 0.08 \\ 0.07 \end{bmatrix}, \quad \Upsilon = \begin{bmatrix} 0.8 \\ 1 \\ 1.2 \\ 1.4 \\ 1.5 \end{bmatrix}.$$

На рис. 6 приведён график изменения ускорения для этих исходных данных.

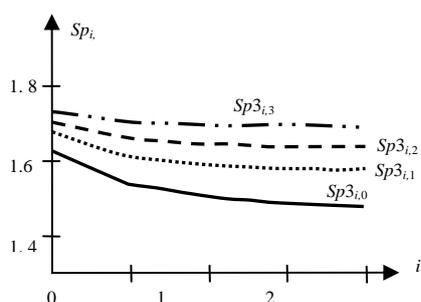


Рис.6. Графики изменения ускорений для различных технологий

Анализ графиков, представленных на рисунке 6, показывает, что значения ускорения работ Sp3i3, Sp3i2, Sp3i1, соответствующие трем технологиям, не сильно отличаются друг от друга. Поэтому данные технологии могут быть рекомендованы для проведения проектно - конструктор-

ских работ. Технология Sp3i0 менее эффективна, так как значение ускорения значительно уменьшается при возрастании количества итераций.

Выводы

1. Проектно-конструкторские работы имеют итерационный характер в связи с внесением изменений в проект и исправлением допущенных ошибок.

2. Сокращение времени на разработку проектной документации достигается за счёт распараллеливания проектно - конструкторских работ и уменьшения количества итераций, что предполагает определенные затраты.

3. Предложенная итерационная модель позволяет рассчитать ускорение проектно-конструкторских работ и одновременно учесть затраты на координацию распараллеливания работ и исправление ошибок.

4. Величина ускорения зависит от доли последовательно и параллельно выполняемых работ, что позволяет выделить две стратегии ведения проектно-конструкторских работ по технологии нисходящего проектирования.

5. Сравнение стратегий по различным параметрам показало, что ускорение зависит от доли выполняемых последовательных и параллельных работ, от количества задействованных подразделений и используемых информационных технологий, следствием чего является возможность изменения этих параметров с целью оптимизации процесса управления проектированием и структуры проектной организации.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научно и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы", государственный контракт № 14.740.11.0126 от 13.09.2010 г.

Библиографический список

1. Вейссхаар, Т. А. Человеческий фактор в проектировании авиационных конструктор-

ций [Текст] / Т. А. Вейсхаар, В. А. Комаров // Полет. — 1998. — № 1. — С. 17-23.

2. Афанасьев, П. П. Основы устройства, проектирования, конструирования и производства летательных аппаратов [Текст] / П. П. Афанасьев [и др.]. — М.: Изд-во МАИ, 2006. — 528 с.

3. Российская энциклопедия CALS. Авиационно-космическое машиностроение [Текст] / А. Г. Братухин [и др.]. — М.: ОАО «НИЦ АСК», 2008. — 608 с.

4. Методика нисходящего проектирования при разработке изделий в системе Pro/ENGINEER [Текст]: регламент предприятия ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс». — 53 с.

5. Иващенко, А. В. Автореинжиниринг единого информационного пространства предприятия [Текст] / А. В. Иващенко, М. Е. Кременецкая; Рос. акад. наук, Самар. науч. центр: СНЦ РАН, 2006. — 116 с.

6. Иващенко, А. В. Технология автореинжиниринга единого информационного пространства предприятия [Текст] / А. В. Иващенко // Вестн. Самар. гос. аэрокос. ун-та, 2009. — № 2 — С. 124 — 134.

7. Кременецкая, М. Е. Системный анализ и управление единым информационным пространством машиностроительного предприятия [Текст] : автореферат дис. канд. техн. наук / Кременецкая Марина Евгеньевна. — Самара, 2007. — 18с.

8. Кудряшов, Ю. И. Моделирование задач многофазной многоком-

понентной фильтрации на многопроцессорных вычислительных комплексах [Текст] / Ю.И. Кудряшов, А.Ю. Максимов; Препринт №68, ИПМ им. М.В. Келдыша, 2009. - 25 с.

References

1. Komarov V.A., Weisshaar T.A. The human factor in the design of aircraft structures // Polyot (Flight). 1998. 11. P. 17-23

2. Based devices, design, engineering and manufacturing of aircraft Basics of aircraft structures design and manufacturing / P.P. Afanasyev et al. □ М.: Press MAI, 2006. 528 p.: fig.

3. Russian encyclopedia of CALS. Aerospace engineering / Chief editor A.G. Bratuhin. М.: ОАО “NIC ASK”, 2008. 608 p.: fig.

4. Top-down design methodology for product development in Pro/ENGINEER [Text]: regulatory rules of Samara space centre (TSSKB “Progress”). - 53 p.

5. Ivashenko A.V., Kremenetskaya M.E. Auto-re-engineering of company common information space [Text] / A.V. Ivashenko, M.E. Kremenetskaya; Samara: Samara science center RAC, 2006. - 116 p., fig.

6. Ivashchenko A.V. Process of autoreengineering of enterprise common information space [Text] / A.V. Ivashenko; Vestnik of Samara state aerospace university, 2009, vol. 2, - p. 124 – 134

7. Kremenetskaya M.E. System analysis and management of common information space of engineering company [Text]: Author’s abstract of candidate of science / Kremenetskaya Marina E.; Samara, 2007. -18 p.

8. Kudryashov Y.I., Maximov A.Y. Modeling of polyphase multicomponent filtering on multy-processor computer systems [Text] / Y.I. Kudryashov, A.Y. Maximov; Preprint 168, IPM of M.V. Keldysh, 2009, - 25 p.

MODEL FOR THE ESTIMATION OF DESIGN WORK ACCELERATION BY PARALLELIZATION OF ITERATIVE PROCESS IN RESEARCH-INTENSIVE MECHANICAL ENGINEERING

© 2010 V. A. Komarov¹, M. Ye. Kremenetskaya¹, A. V. Sologub², A. N. Filatov²

¹Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University)

²State Research and Production Space Rocket Center “TsSKB – Progress”

A model for the estimation of design work acceleration by parallelization taking into account coordination and iteration costs is proposed. Different approaches for top-down design and their impact on work acceleration are considered. Ways of using the model for the optimization of design management and company structure are shown.

Design, simulation, parallelization, iterations, acceleration, information technology.

Информация об авторах

Комаров Валерий Андреевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструкции и проектирования летательных аппаратов. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: оптимальное проектирование авиационных конструкций. E-mail: vkomarov@ssau.ru.

Кременецкая Марина Евгеньевна, доцент кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов, кандидат технических наук. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: системный анализ и управление процессом проектирования изделий аэрокосмической отрасли. E-mail: mme82@mail.ru.

Соллогуб Анатолий Владимирович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник. ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс». Область научных интересов: моделирование и автоматизация проектирования ракетно-космических систем. E-mail: csdb@samtel.ru.

Филатов Александр Николаевич, начальник управления информационных технологий. ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс». Область научных интересов: формирование единого информационного пространства предприятия, методология создания ракетно-космической техники на основе САПР и PLM. E-mail: d0088@samspace.ru

Komarov Valery Andreyevitch, doctor of technical sciences, professor, head of aircraft design department. Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). Area of research: optimal design of aircraft structures. E-mail: vkomarov@ssau.ru.

Kremenetskaya Marina Yevgenyevna, candidate of technical sciences, associate professor of aircraft design department. Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). Area of research: system analysis and design product management of aerospace industry. E-mail: mme82@mail.ru.

Sologub Anatoly Vladimirovitch, doctor of technical science, professor, chief scientist of State Research and Production Space Rocket Center “TsSKB – Progress”. Area of research: modelling and automatization of space-rocket systems design. E-mail: csdb@samtel.ru.

Filatov Alexander Nikolayevitch, head of the information technology department. State Research and Production Space Rocket Center “TsSKB – Progress”. Area of research: formation of enterprise common data space, space-rocket system design technique based on CAD and PLM. E-mail: d0088@samspace.ru.