

Один из подходов к повышению надежности выполнения динамических операций на примере транспортных грузовых кораблей ТГК «Прогресс»

© А.В. Донсков¹, Н.В. Мишурова^{1,2}

¹ОАО «РКК «Энергия», г. Королев, Московская обл., 141070, Россия

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрена задача повышения надежности выполнения динамических операций космическим кораблем на всех этапах его полета. Выявлена и обоснована необходимость совершенствования методов контроля и анализа текущего состояния космического корабля. Предложен новый подход к использованию методологических инструментов для контроля текущего состояния космического корабля (прогнозирование и парирование) на случай возникновения аварийных ситуаций в ходе полета в условиях ограниченного промежутка времени при недостаточности информации на примере схемы сближения и стыковки ТГК «Прогресс».

Ключевые слова: управление полетом, космический корабль, ТГК «Прогресс», нечеткие множества, лингвистические переменные, оперативный контроль.

Введение. В настоящее время совершенствуется баллистическая составляющая методики управления полетом — переход с двухсубточной схемы сближения и стыковки (34 витка) космического корабля (КК) с российским сегментом Международной космической станции (РС МКС) на четырехвитковую (так называемую быструю схему). Это позволяет существенно сократить время его автономного полета и тем самым ускорить процесс доставки экипажей и грузов на борт РС МКС. Так как необходимо за короткий промежуток времени выполнить все требующиеся операции [1] для обеспечения сближения и стыковки КК с РС МКС, то изменятся и усложнятся следующие процессы:

- планирование полета КК и МКС (сократится временная циклограмма подготовки командно-программной информации для сеансов связи, появится неопределенность циклограммы проведения второго маневра и т. д.);

- контроль состояния работы бортовых систем КК (появится высокая интенсивность обмена командно-программной информацией при отсутствии виткового резервирования, ограничится время для контроля записанных в ЦВМ управляющих воздействий и для оперативного анализа ситуации в целом);

- зона радиовидимости для обеспечения сеансов связи по приему телеметрии, выдачи управляющих воздействий, выполнения режима радиоконтроля орбиты и т. д.

Таким образом, реализация «быстрой» схемы актуализирует контроль состояния работы бортовых систем [2], так как в ограниченный промежуток времени и в условиях недостаточности информации следует оперативно распознавать нештатные ситуации и принимать решения по их парированию. Для принятия правильных решений по изменению текущего состояния бортовых систем с помощью управляющих воздействий необходимо всесторонне оценить его и дать прогноз дальнейшим изменениям с учетом выданных управляющих воздействий.

В настоящей статье представлено применение методологических инструментов для контроля текущего состояния КК (прогнозирование и парирование) на случай возникновения аварийных ситуаций в ходе полета в условиях ограниченного промежутка времени при недостаточности информации [3, 4] на примере схемы сближения и стыковки КК.

Видоизменение схемы сближения и стыковки космического корабля. Программа сближения и стыковки КК представляет собой набор полетных операций, которые выполняются в строгой последовательности на определенных витках. Такой алгоритм реализации полетных операций, в частности для двухсуточной схемы сближения и стыковки, позволяет осуществить контроль их выполнения на текущем витке в ходе сеанса связи и, если необходимо, повторить выдачу управляющих воздействий. «Размеренность» двухсуточной схемы обеспечивает достаточным количеством времени для контроля общего состояния работы систем КК без динамических операций (рисунок), что важно для безопасности экипажа [5], состояния КК в целом, а также для выполнения плана полета.

Помимо перекомпоновки выполнения полетных операций на определенных витках произошли изменения в алгоритмах выполнения разворотов для построения необходимой ориентации и получения готовности системы ориентации. В «быстрой» схеме применяется алгоритм форсированного разворота перед третьим и четвертым импульсами коррекции орбиты на втором и третьем витках. Несмотря на то что алгоритм был отработан на наземных комплексах, в нем были выявлены несоответствия в ходе реального полета ТПК «Союз ТМА-12М», которые привели к переходу на двухсуточную схему сближения и стыковки, так как было недостаточно времени для полного анализа причин некорректности алгоритма. При этом вероятность проявления несоответствий была крайне малой.

Поэтому обеспечение методологическим инструментом специалистов по контролю и анализу текущего состояния КК и его оценки позволит повысить уровень их подготовки и даст возможность оперативно решать задачи по парированию нештатных ситуаций.

Полетные операции для двухсуточной схемы			Полетные операции для четыреххитковой схемы	
Виток	Операция		Виток	Операция
1	Выведение на ОПЗ Раскрытие элементов конструкции		1	Выведение на ОПЗ Раскрытие элементов конструкции Тест СУДН № 1
2	Тест СУДН № 1 ВИПШ	→	1–2	Маневр № 1 на ДПО-К2
3–4	Маневр № 1 на ДПО-К2	→	2	ВИПШ: Тест ТВ Тест ТОРУ Тест координатных ДПО-К1
5	Переход на подачу топлива из второй секции КДУ	→	2–3	Маневр № 2 на ДПО-К1
14	Заливка магистралей СД	→	3	Переход на подачу топлива из второй секции КДУ
15	Тест ТОРУ	→	3–5	Маневры по бортовому алгоритму автономного сближения
16	Тест ТВ	→	5	Стыковка
17–18	Маневр № 2 на ДПО-К1		В составе станции	Заливка магистралей СД
32–34	Маневры по бортовому алгоритму автономного сближения			
34	Стыковка			

Переход полетных операций для выполнения сближения и стыковки космического корабля с двухсуточной на четыреххитковую схему

Математическая модель для оценки текущего состояния. Во время управления полетом КК специалисты чаще оперируют терминами и описывают состояние систем КК переменными [6, 7], значениями которых могут быть слова или предложения естественного или формального языка. Использование словесных описаний, которыми оперирует человек во время управления полетом КК, дает возможность анализировать сложнейшие системы, которыми являются бортовые системы КК, недоступные обычному математическому анализу. Такие переменные называются лингвистическими [8].

Значениями лингвистической переменной являются нечеткие множества, символами которых служат слова и предложения в естественном или формальном языке, как правило, представляющие собой некоторую элементарную характеристику явления.

Например, нечеткая переменная *давление* может принимать следующие значения: высокое, невысокое, довольно высокое, очень высокое, высокое, но не очень, вполне высокое, более или менее высокое [9, 10]. Эти значения представляют собой предложения, образованные понятием *высокое*, отрицанием *не*, союзами *и*, *но*, а также словами *очень*, *довольно*, *вполне*, *более* или *менее*.

Такой подход дает приближенные, но в то же время эффективные способы описания поведения систем, настолько сложных и плохо определенных, что они не поддаются точному математическому анализу.

Лингвистическую переменную можно представить в виде множества $\lambda (N, T, X, G, M)$, в котором N — имя выбранной переменной; T — терм-множество N , т. е. совокупность ее лингвистических значений; X — универсальное множество с базовой переменной x ; G — синтаксическое правило, которое может быть задано в форме бесконтекстной грамматики, порождающей термы-множества T ; M — семантическое правило, которое каждому лингвистическому значению t ставит в соответствие его смысл, причем $M(t)$ обозначает нечеткое подмножество множества X [11].

Язык можно рассматривать как соответствие между множеством терминов T и областью рассуждения X . Это соответствие характеризуется нечетким называющим отношением N из T в X , которое связывает с каждым термином t в T и каждым элементом x в X степень $\mu(t, x)$ применимости t к x .

Для фиксированного t функция принадлежности $\mu(t, x)$ определяет нечеткое подмножество $M(t)$ из множества X , которое является смыслом или значением. Таким образом, значение термина t есть нечеткое подмножество $M(t)$ из множества X , для которого t служит символом.

Термин может быть элементарным, например $t =$ высокое, или составным, когда он является сочетанием элементарных терминов, например, $t =$ очень высокое.

Более сложные понятия могут характеризоваться составной лингвистической переменной. Например, понятие *система* может рассматриваться как название составной лингвистической переменной [12], компонентами которой служат лингвистические переменные *ресурс*, *узел*, *рабочее тело* и т. п., что относится к основным характеристикам состояния пилотируемого КК.

Пример применения математической модели. Рассмотрим пример обнаружения возникновения нештатной ситуации на борту КК, например, утечку теплоносителя во внутренний объем КК.

Представленный подход позволяет прогнозировать последствия аварийной ситуации, связанной с утечкой теплоносителя, при отсутствии точных данных, которые получены в течение сеанса связи.

Но небольшая длительность сеансов связи не дает точного понимания динамики изменения параметров и возникает неопределенность. Для анализа параметров, вышедших за пределы штатных значений, в качестве переменных предлагается использовать общепринятую лингвистическую пятибалльную шкалу. Взаимосвязь между предложенной шкалой и определением влияющих факторов в качестве лингвистических переменных предложено оценить, как функциональную зависимость: $R_i = f(x_1, x_2, \dots, x_j)$, где R_i — возможные последствия нештатной ситуации; $X_1 - X_j$ — соответствующий набор факторов, влияющих на возникновение нештатной ситуации.

Введем следующие обозначения: X_1 — давление теплоносителя в магистралях, X_2 — объем теплоносителя, вытекшего во внутренний объем КК, X_3 — скорость перемещения воздушных масс (в соответствии с работой внутренних вентиляторов), R — радиус разлета по внутреннему объему.

Базовые события, которые отвечают лингвистическим переменным, описывающим влияющие факторы $X_1 - X_3$, были определены квалифицированными экспертами (согласно технической документации). Нижние и верхние значения базовых событий, соответствующие значениям лингвистических переменных $X_1 - X_3$ и R , оцениваются по пятибалльной шкале: низкое, ниже среднего, среднее, выше среднего, высокое. Каждое значение лингвистической переменной представляет собой нечеткое множество, заданное с помощью соответствующей функции принадлежности. Для введенных лингвистических переменных $X_1 - X_3$ и R определены числовые диапазоны значений с соответствующими лингвистическими оценками, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Определение влияющих факторов в виде лингвистических переменных

Лингвистическая переменная	Лингвистическая шкала	Числовой диапазон
X_1 — давление теплоносителя в магистралях, мм рт. ст.	Низкое	1190...1200
	Ниже среднего	1200...1207
	Среднее	1208...1214
	Выше среднего	1215...1220
	Высокое	1220...1230
X_2 — объем выброса, дм ³	Малый	0..0,25
	Ниже среднего	0,25...0,5
	Средний	0,5...0,75
	Выше среднего	0,75...1
	Большой	> 1
X_3 — скорость перемещения воздушных масс, м/с	Низкая	0...0,1
	Ниже средней	0,1...0,2
	Средняя	0,2...0,3
	Выше средней	0,3...0,4
	Высокая	> 0,4
Y — радиус разлета, м	Малый	0...0,05
	Ниже среднего	0,05...0,1
	Средний	0,15...0,2
	Выше среднего	0,2...0,3
	Большой	> 0,3

Во избежание сложностей при вычислении радиуса зоны разлета предлагаются все возможные ситуации, которые могут состояться при прогнозе, и диапазоны при различных значениях факторов, влияющих на возникновение нештатной ситуации.

Прогнозирование осуществляется с помощью разработанных правил нечеткого логического вывода вида $IF X=A THEN Y=B$ [10]. Непосредственно разработка правил условного логического вывода охватила известный тип следующего логического предложения: $P3 = IF X, is A_i \text{ and } X_2 \text{ is } A_2 \text{ and... } X \text{ is } A_n THEN Y \text{ is } B.$

При анализе возможных радиусов зон загрязнения следует учитывать нечеткие исходные данные и поэтому рассматривать состояние, которое возникает в случае максимального радиуса зоны загрязнения (табл. 2).

Следующим шагом является разработка нечетких логических правил для проведения прогноза последствий аварийной ситуации при нечетких исходных данных.

Получено пять групп правил, любая из которых соответствует какому-либо значению параметра. Например, первая группа правил описывает возможное логико-лингвистическое соединение влияющих факторов R , которые приводят к значению низкому (Н), вторая группа, соответственно, — к значению ниже среднего (НС), третья — среднему (С), четвертая — выше среднего (ВС), пятая группа приводит к значению высокому (В) (табл. 2).

Таблица 2

Значение радиуса зоны загрязнения при токсичности

Давление теплоносителя в магистралях	Объем выброса	Скорость перемещения воздушных масс	Радиус разлета теплоносителя	
			Лингвистическая оценка	Числовой диапазон, м
Н	Н	Н	Н	0...0,05
Н	ВС	НС	НС	0,05...0,1
Н	В	Н	С	
НС	НС	Н	НС	0,15...0,2 0,2...0,3
НС	ВС	Н	С	
НС	НС	Н	НС	
С	ВС	С	С	
ВС	В	ВС	ВС	
НС	С	В	В	> 0,3

Таким образом, не имея четких значений параметров, описывающих текущее состояние КК, и зная место возникновения значения НС, получена близкая к действительности картина происходящего. Исходя из нее у лица, принимающего решение, есть понимание того, какие дальнейшие действия следует предпринимать по парированию текущей нештатной ситуации согласно технической документации.

Заключение. Динамические операции требуют повышенного контроля текущего состояния КК в целях их выполнения и обеспечения безопасности экипажа. Сокращение продолжительности их вы-

полнения требует оперативной оценки текущего состояния КК и в случае возникновения нештатной ситуации принятия шагов по ее устранению. Применение простых математических моделей в процессе управления полетом КК ускоряет подготовку исходных данных для принятия решений за счет уменьшения количества возможных значений вероятностных состояний КК. Оперирование лингвистическими понятиями, свойственными мышлению человека, ведет к упрощению процедуры принятия решения лицом, принимающим решения, а также к пониманию текущей ситуации на всех уровнях структуры управления полетом. Внедрение математических моделей в программные комплексы, например в адаптивный тренажер, позволит повысить уровень оперативности и эффективности действий группы управления полетом по парированию аварийных ситуаций на борту КК.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кравец В.Г., Любинский В.Е. *Основы управления космическими полетами*. Москва, Машиностроение, 1983, 256 с.
- [2] Соловьёв В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е. *Управление космическими полётами*. Т. 1, 2. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009, 426 с.
- [3] Назаров А.В., Козырев Г.И., Шитов И.В. *Современная телеметрия в теории и на практике*. Санкт-Петербург, Наука и техника, 2007, 672 с.
- [4] Милицин А.В., Самсонов В.К., Ходак В.А. *Отражение информации в центре управления космическими полетами*. Москва, Радио и связь, 1982, 131 с.
- [5] Гасов В.М., Коротаев А.И., Сенькин С.И. *Отражение информации*. Москва, Высшая школа, 1990, 111 с.
- [6] Добров Б.В., Иванов В.В., Лукашевич Н.В., Соловьёв В.Д. *Онтологии и тезаурусы: модели, инструменты, приложения*. Москва, ИНГУИТ, 2008, 220 с.
- [7] Заде Л. *Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений*. Москва, Мир, 1976, 167 с.
- [8] Борисов А.Н., Алексеев А.В., Крумберг О.А. и др. *Модели принятия решений на основе лингвистической переменной*. Рига, Зинатне, 1982, 256 с.
- [9] Матюшин М.М., Мишурова Н.В., Донсков А.В. Структуризация и использование знаний в процессе оперативного контроля состояния пилотируемых космическими аппаратами. *Наука и образование*, 2012, № 10. <http://dx.doi.org/10.7463/1012.0479653>
- [10] Трухаев Р.И. *Модели принятия решений в условиях неопределенности*. Москва, Наука, 1981, 258 с.
- [11] Саати Т. *Принятие решений. Метод анализа иерархий*. Москва, Радио и связь, 1993, 278 с.
- [12] Синюк В.Г., Котельников А.П., Цветков С.В. *Элементы теории и практика принятия решений*. Санкт-Петербург, Химия, 1990, 93 с.

Статья поступила в редакцию 27.01.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Донсков А.В., Мишурова Н.В. Один из подходов к повышению надежности выполнения динамических операций на примере транспортных грузовых кораблей «Прогресс». *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 4.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-04-1486>

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XL Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 26–29 января 2016 г.

Донсков Алексей Витальевич — инженер ОАО «РКК «Энергия». e-mail: aleksej_ne@mail.ru

Мишурова Наталья Валерьевна — инженер ОАО «РКК «Энергия». e-mail: trigonella@mail.ru

An approach to improving the reliability of performing dynamic operations on the example of cargo vehicle TCV "Progress"

© A.V. Donskov¹, N.V. Mishurova^{1,2}

¹S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia, Korolev town, Moscow region, 141070, Russia

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The article considers the problem of increasing the reliability of performing dynamic spacecraft operations at the all stages of flight. The necessity of improving the control and analysis methods of the current spacecraft status is revealed and justified. The new approach to using methodological tools for monitoring the current spacecraft status (forecasting and counteracting) in case of an emergency during time bounded flight with the lack of information is proposed on the example of TCV "Progress" rendezvous diagram and docking schedule.

Keywords: flight control, spacecraft, TCV "Progress", fuzzy sets, linguistic variables, operational control.

REFERENCES

- [1] Kravets V.G., Lubinskiy V.E. *Osnovy upravleniya kosmicheskimi poletami* [Basics of Space Flight Control]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1983, 256 p.
- [2] Solovyev V.A., Lysenko L.N., Lubinskiy V.E. *Upravlenie kosmicheskimi poletami* [Space Flight Control]. Moscow, BMSTU Publ., 2009, 426 p.
- [3] Nazarov A.V., Kozyrev G.I., Shitov I.V., et al. *Sovremennaya telemetriya v teorii i na praktike* [Modern Telemetry in Theory and Practice]. St. Petersburg, Nauka i Tekhnika Publ., 2007, 672 p.
- [4] Militin A.V., Samsonov V.K., Khodak V.A. *Otobrazhenie informatsii v tsentre upravleniya kosmicheskimi poletami* [Information Display in a Space Operations Center]. Moscow, Radio i Svyaz Publ., 1982, 131 p.
- [5] Gasov V.M., Korotaev A.I., Senkin S.I. *Otobrazhenie informatsii* [Information Display]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990, 111 p.
- [6] Dobrov B.V., Ivanov V.V., Lukashevich N.V., Solovyev V.D. *Ontologii i tezaurusy: modeli, instrumenty, prilozheniya* [Ontologies and Thesauri: Models, Tools, Applications]. Moscow, INTUIT Publ., 2008, 220 p.
- [7] Zadeh L. *Journal: Information Sciences*, ISCI, 1975, vol. 8, no. 3, pp. 199–249. [In Russian: Zadeh L. *Ponyatie lingvisticheskoy peremennoy i ee primeneniye k prinyatiyu priblizhennykh resheniy*. Moscow, Mir Publ., 1976, 167 p.]
- [8] Borisov A.N., Alekseev A.V., Krumberg O.A., et al. *Modeli prinyatiya resheniy na ocнове lingvisticheskoy peremennoy* [Models of Decision Making on the Basis of Linguistic Variable]. Riga, Zinatne Publ., 1982, 256 p.
- [9] Matushin M.M., Mishurova N.V., Donskov A.V. *Nauka i obrazovanie: elektronnyy nauchno-tehnicheskii zhurnal – Science and Education: Electronic Scientific and Technical Journal*, 2012, no. 10.
Available at: <http://dx.doi.org/10.7463/1012.0479653>

- [10] Trukhaev R.I. *Modeli prinyatiya resheniy v usloviyakh neopredelennosti* [Models of Decision Making under Ambiguity]. Moscow, Nauka Publ., 1981, 258 p.
- [11] Saaty Th. L. *Decision Making for Leaders: The Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World*. Pittsburgh, Pennsylvania, RWS Publications. ISBN 0-9620317-8-X. [In Russian: Saati T. *Prinyatie resheniy. Metod analiza ierarhiy*. Moscow, Radio i Svyaz Publ., 1993, 278 p.].
- [12] Sinuk V.G., Kotelnikov A.P., Tsvetkov S.V. *Elementy teorii i praktika prinyatiya resheniy*. [Elements of the Theory and Practice of Decision-Making]. St. Petersburg, Khimiya Publ., 1990, 93 p.

Donskov A.V. (b. 1986) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2009. Engineer, S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia.
e-mail: aleksej_ne@mail.ru

Mishurova N.V. (b.1986) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2009. Engineer, S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia.
e-mail: trigonella@mail.ru