

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 4 (121)

апрель

2011

Редакционный совет:

КУЗНЕЦОВ Н. А.
МАКАРОВ И. М.
МАТВЕЕНКО А. М.
ПЕШЕХОНОВ В. Г.
СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М.
ФЕДОРОВ И. Б.

Главный редактор:

ТЕРЯЕВ Е. Д.

Заместители гл. редактора:

ПОДУРАЕВ Ю. В.
ПУТОВ В. В.
ЮЩЕНКО А. С.

Выпускающий редактор:

ФИЛИМОНОВ Н. Б.

Ответственный секретарь:

ПЕТРИН К. В.

Редакционная коллегия:

АЛЕКСАНДРОВ В. В.
АНТОНОВ Б. И.
АРШАНСКИЙ М. М.
БОГАЧЕВ Ю. П.
БУКОВ В. Н.
ВОСТРИКОВ А. С.
ГРАДЕЦКИЙ В. Г.
ГОЛУБЯТНИКОВ И. В.
ИВЧЕНКО В. Д.
ИЛЬЯСОВ Б. Г.
КАЛЯЕВ И. А.
КОЛОСОВ О. С.
КОРОСТЕЛЕВ В. Ф.
КРАСНЕВСКИЙ Л. Г.
КУЗЬМИН Н. Н.
ЛЕБЕДЕВ Г. Н.
ЛЕОНОВ Г. А.
ЛЁВИН Б. А.
ЛОХИН В. М.
НОРЕНКОВ И. П.
ПАВЛОВСКИЙ В. Е.
ПРОХОРОВ Н. Л.
РАПОПОРТ Э. Я.
РАЧКОВ М. Ю.
РЕЗЧИКОВ А. Ф.
СЕБРЯКОВ Г. Г.
СИГОВ А. С.
СИРОТКИН О. С.
СОЙФЕР В. А.
ТИМОФЕЕВ А. В.
ФИЛАРЕТОВ В. Ф.
ФУРСОВ В. А.
ХИМЕНКО В. И.
ЮРЕВИЧ Е. И.
ЮСУПОВ Р. М.

Редакция:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.
ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.
ЧУГУНОВА А. В.

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Разоренов Г. Н.** Метод синтеза законов "мягкого" и "сверхмягкого" управления конечным состоянием динамических систем 2
Фуртат И. Б. Консенсусное управление линейной динамической сетью по выходу с компенсацией возмущений 12

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

- Григорьев С. Н.** Научно-технические проблемы построения современных технологических систем с числовым программным управлением 19
Бобырь М. В. Модифицированный алгоритм нечетко-логического вывода в задачах управления оборудованием с ЧПУ 26
Никитин Ю. Р., Абрамов И. В. О построении системы диагностирования станков с ЧПУ 32

КОНТРОЛЬ И ИЗМЕРЕНИЯ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

- Боровик С. Ю.** Система измерения смещений торцов лопаток с распределенным кластером одновитковых вихретоковых датчиков 36
Коровин Я. С., Хисамутдинов М. В. Фильтрация изображений в целях выделения эллипсов в системе бесконтактного определения разновысотности тепловыделяющих сборок активной зоны реактора типа ВВЭР-1000 42

ПРОГРАММНЫЙ ИНЖИНИРИНГ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

- Колоденкова А. Е.** Нечетко-множественный подход к оценке реалистичности альтернатив программно-обеспеченных мехатронных систем 45
Карсаев О. В., Коношый В. Г., Тихомиров В. В., Троцкий Д. В. Многоагентная система планирования работ на космодроме Байконур 53
Жарковский А. В., Лямкин А. А., Тревгода Т. Ф. Автоматизация процесса отладки программных комплексов управления сложными техническими системами 61

Журнал в журнале

"УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА В АВИАКОСМИЧЕСКИХ И МОРСКИХ СИСТЕМАХ"

- Сапунков Я. Г., Молоденков А. В.** Исследование особого режима управления в задаче оптимального разворота произвольного твердого тела (космического аппарата) 67
Девятисильный А. С., Числов К. А. Модель позиционно корректируемой двухкомпонентной гравитационной навигационной системы на основе интерпретации принципа Д'Аламбера 71
Грязин Д. Г., Скалон А. И., Величко О. О., Чекмарев А. Б. Опыт аттемтации трехосного поворотного стенда фирмы Acutromc 75
Contents 79

Журнал входит в Перечень периодических изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук; журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу:
<http://novtex.ru/mech>, e-mail: mec@novtex.ru

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 681.5:629.7

Г. Н. Разоренов, д-р техн. наук, проф.,
Военная академия РВСН им. Петра Великого
razorenov.g.n@yandex.ru

Метод синтеза законов "мягкого" и "сверхмягкого" управления конечным состоянием динамических систем

Рассматривается задача синтеза законов управления конечным состоянием динамической системы в нетрадиционной постановке, когда наряду с краевыми условиями для параметров состояния системы задаются краевые условия для управляющих воздействий. Законы управления, обеспечивающие нулевые значения управляющих воздействий в терминальный момент времени, названы законами "мягкого" управления. Законы управления, при которых обеспечиваются нулевые значения не только самих управляющих воздействий, но и ряда их последовательных производных по времени, названы законами "сверхмягкого" управления. Практическая целесообразность применения подобных законов в алгоритмах управления летательными аппаратами и объектами других типов показана в ряде работ, приведенных в списке литературы.

Ключевые слова: терминальное управление, терминальное (конечное) состояние системы и терминальный (конечный) момент времени, законы управления разомкнутого и замкнутого типов, законы "мягкого" и "сверхмягкого" управления

Введение

Одной из первых отечественных работ, в которой были рассмотрены законы "мягкого" и "сверхмягкого" управления и показана целесообразность их применения в задачах управления движением летательных аппаратов и объектов других типов, является монография А. П. Батенко [1]. Однако в этой работе данные законы управления были получены лишь для частного случая линейной системы второго порядка, а общий метод синтеза управлений не рассматривался. Тем не менее, приведенные в этой монографии законы управления, выраженные в виде программ управления разомкнутого типа, а также в виде законов замкнутого управления, сформированных по принципу обратной связи, нашли затем многочисленные применения как сами по себе, так и в рамках общей концепции синтеза управлений по методу решения обратных задач динамики [2].

Постановка общей задачи синтеза законов "мягкого" и "сверхмягкого" управления конечным состоянием многомерных нелинейных динамических систем, а также ее решение методами вариационного исчисления принадлежит доктору технических наук, профессору В. Н. Бородавскому, научному сотруднику НППЦ АП им. акад. Н. А. Пилюгина. Основное содержание разработанного В. Н. Бородавским метода синтеза законов "мягкого" и "сверхмягкого" управления изложено в публикациях [3, 4]. В этих же публикациях показана целесообразность применения таких законов для управления процессом силового приведения гиростабилизированной платформы (ГСП) ракеты в заданное угловое положение перед пуском. В частности, в работе [4] показано, что при управлении угловыми разворотами ГСП традиционными методами требуется мгновенное обнуление управляющего момента при достижении ГСП заданного терминального состояния. Однако на практике обнуление управляющего момента возможно лишь за некоторое конечное время. Данное обстоятельство негативно влияет на точность управления и ухудшает динамику переходных процессов в окрестности терминального состояния. Применение в этих условиях закона "мягкого" управления обеспечивает плавное уменьшение управляющего момента по мере приближения к терминальному состоянию, что, как показывают эксперименты, заметно повышает точность управления. Эффективность аналогичных законов управления применительно к другим типам объектов показана в [5] на примере задачи управления полетом ступени разведения элементов полезной нагрузки ракеты-носителя, где трудно выполнимое на практике требование мгновенного обнуления тяги двигательной установки ступени разведения также может быть снято и заменено законом управления, обеспечивающим плавное уменьшение тяги двигательной установки (ДУ) до нулевого значения по мере приближения объекта управления к заданному терминальному состоянию.

Накопленный к настоящему времени опыт применения законов "мягкого" и "сверхмягкого" управления показывает, что данное направление теории аналитического конструирования терминальных регуляторов заслуживает дальнейшего развития и совершенствования. Актуальным является также поиск новых подходов к задаче синтеза управлений, обладающих теми или иными преимуществами по сравнению с известным методом.

Цель настоящей публикации состоит в том, чтобы изложить один из таких новых подходов к задаче синтеза законов "мягкого" и "сверхмягкого" управления для класса линейных и линеаризованных моделей динамических систем. В отличие от вариационного метода В. Н. Бородовского данный подход не использует понятий вариационного исчисления, а опирается на предварительно найденный оптимальный закон управления, полученный согласно методике принципа максимума Л. С. Понтрягина. Это существенно упрощает всю методологию синтеза управлений и делает ее предельно прозрачной. Основу данного подхода составляет идея введения в оптимальный закон управления, сформированный в рамках классической задачи синтеза, дополнительных функций влияния. Эта мера позволяет увеличить число степеней свободы управляющих воздействий, чем и обеспечивается возможность решения задачи синтеза с дополнительными краевыми условиями, характеризующими свойства мягкости и сверхмягкости искомого закона управления. Основные положения данного подхода излагались ранее в [5, 6].

1. Постановка задачи

В постановке задачи синтеза управлений по методу В. Н. Бородовского (см. [3]) первоначально рассматривается нелинейная система в виде совокупности нелинейных дифференциальных уравнений с краевыми условиями в виде многообразий. Однако далее в соответствии с принятым в этом методе вариационным подходом задача сводится к синтезу управлений в линеаризованной системе с краевыми условиями в виде линейных многообразий. Учитывая это, будем сразу ставить задачу управления для линейной динамической системы, минуя процедуры линеаризации нелинейной системы и перехода к уравнениям в вариациях. Это существенно упрощает всю методологию синтеза управлений, не умаляя вместе с тем общности получаемых результатов. Итак, рассмотрим модель линейной нестационарной динамической системы:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(t)\mathbf{x} + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}; \quad (1.1)$$

$$\mathbf{x} \in X \subset R^n; \mathbf{u} \in U \subset R^m; t \in [t_0, t_k].$$

Здесь \mathbf{x} — n -мерный вектор параметров состояния системы; \mathbf{u} — m -мерный вектор управляющих воздействий; X и U — фазовое пространство и пространство управлений системы (1.1). Векторы \mathbf{x} и \mathbf{u} рассматриваются здесь как столбцы. Предполагается, что ограничения на величину управляющих воздействий, как и на длительность процесса управления, отсутствуют, а функции, описывающие матрицы $\mathbf{A}(t)$ и $\mathbf{B}(t)$, непрерывны и дифференцируемы.

Будем полагать, что система (1.1) обладает свойством полной достижимости, что гарантирует существование решения задачи управления конечным состоянием системы во всем фазовом пространстве при произвольных начальных и конечных состояниях. По известному критерию Р. Калмана ([7], с. 46) свойство полной достижимости системы гарантируется фактом невырожденности матрицы достижимости данной системы:

$$Q(t_0, t_k) = \int_{t_0}^{t_k} \Phi(t_k, t)\mathbf{B}(t)\mathbf{B}^T(t)\Phi^T(t_k, t)dt; \quad (1.2)$$

$$|Q(t_0, t_k)| \neq 0.$$

В формуле (1.2) $\Phi(t_k, t)$ есть переходная матрица, определенная равенством

$$\Phi(t_k, t) = \psi(t_k)\psi^{-1}(t),$$

где $\psi(t)$ — фундаментальная матрица однородной системы

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}. \quad (1.3)$$

В целях упрощения последующего изложения ограничимся задачей управления с закрепленными конечными точками, т. е. будем полагать, что заданы начальное и конечное состояния системы:

$$\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0; \mathbf{x}(t_k) = \mathbf{x}_k. \quad (1.4)$$

В дополнение к краевым условиям (1.4) зададим конечные значения вектора управляющих воздействий и ряда его последовательных производных по времени до порядка l включительно, которые в частном случае могут быть нулевыми:

$$\mathbf{u}(t_k) = \mathbf{u}_k; \quad (1.5)$$

$$\dot{\mathbf{u}}(t_k) = \dot{\mathbf{u}}_k; \quad (1.6)$$

$$\ddot{\mathbf{u}}(t_k) = \ddot{\mathbf{u}}_k; \quad (1.7)$$

...

$$\mathbf{u}^{(l)}(t_k) = \mathbf{u}_k^{(l)}. \quad (1.8)$$

В задаче требуется синтезировать законы разомкнутого (программного) управления, а также законы замкнутого управления, сформированные по принципу обратной связи и обеспечивающие выполнение краевых условий (1.4)—(1.8). Краевые условия (1.6)—(1.8) для производных от управляющих воздействий подразумевают, что искомые законы управления должны обладать свойством дифференцируемости до порядка l включительно в терминальный момент времени. Примем, что соответствующее свойство гладкости должно быть присуще синтезируемым законам управления на всем интервале управления. Требование оптимальности искомых

законов управления по какому-либо критерию постановкой задачи не предусматривается, при этом не исключается, что рассматриваемая задача синтеза управлений может иметь не единственное решение.

Примем следующие определения.

1. Закон управления, обеспечивающий перевод системы (1.1) из заданного начального состояния \mathbf{x}_0 в заданное конечное состояние \mathbf{x}_k , называется законом "мягкого" управления, если управляющие воздействия в терминальный момент времени t_k равны нулю, $\mathbf{u}_k = 0$.

2. Закон управления в той же задаче управления называется законом "сверхмягкого" управления порядка l , если сами управляющие воздействия и их последовательные производные по времени до порядка l включительно равны нулю в терминальный момент времени, $\mathbf{u}_k = \dot{\mathbf{u}}_k = \dots \mathbf{u}_k^{(l)} = 0$.

Сформулированная задача управления с нетрадиционными краевыми условиями (1.5)–(1.9) требует применения специальных способов ее решения. Один из таких способов, излагаемый ниже, основан на использовании хорошо известного в теории управления решения задачи в ее традиционной постановке, когда рассматриваются только краевые условия (1.4) для параметров состояния системы, а к искомому закону управления предъявляется требование его оптимальности по квадратичному критерию минимума энергетических затрат на управление:

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_k} \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u} dt \rightarrow \min_{X, U}, \quad (1.9)$$

где \mathbf{R} — положительно определенная весовая матрица. Для удобства последующих ссылок приведем основные этапы получения данного закона управления.

2. Решение задачи управления в традиционной постановке

Для получения закона управления в задаче с краевыми условиями (1.4) и с критерием оптимальности (1.9) удобно воспользоваться принципом максимума Л. С. Понтрягина. Гамильтониан задачи управления записывается для линейной модели (1.1) и квадратичного критерия (1.9) известным образом [8]:

$$H = \mathbf{p}^T(t)[\mathbf{A}(t)\mathbf{x} + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}] - \frac{1}{2} \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}, \quad (2.1)$$

где $\mathbf{p}(t)$ — вектор вспомогательных переменных, удовлетворяющий системе сопряженных уравнений:

$$\dot{\mathbf{p}} = -\mathbf{A}^T(t)\mathbf{p}. \quad (2.2)$$

Оптимальное управление находится из необходимого условия экстремума гамильтониана по управлению, $\partial H / \partial \mathbf{u} = 0$, и выражается формулой

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T(t) \mathbf{p}(t). \quad (2.3)$$

Известно, что если $\Psi(t)$ — фундаментальная матрица системы (1.3), то фундаментальная матрица сопряженной системы (2.2) имеет вид $[\Psi^T(t)]^{-1}$ (см. [9], с. 81). Поэтому общее решение системы (2.2) может быть записано с помощью переходной матрицы системы (1.3) в виде

$$\mathbf{p}(t) = \Phi^T(t_k, t) \mathbf{c}, \quad (2.4)$$

где \mathbf{c} — n -мерный вектор констант.

Следовательно, в соответствии с (2.3) и (2.4) оптимальное управление в рассматриваемой задаче выражается следующей общей формулой:

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T(t) \Phi^T(t_k, t) \mathbf{c}. \quad (2.5)$$

Для определения вектора констант воспользуемся краевыми условиями (1.4) и формулой Коши:

$$\mathbf{x}(t) = \Phi(t, t_0) \mathbf{x}_0 + \int_{t_0}^t \Phi(t, \tau) \mathbf{B}(\tau) \mathbf{u}(\tau) d\tau. \quad (2.6)$$

Подставим в (2.6) закон управления (2.5) и при $t = t_k$ с учетом $\mathbf{x}(t_k) = \mathbf{x}_k$ получим:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_k - \Phi(t_k, t_0) \mathbf{x}_0 &= \\ &= \left[\int_{t_0}^{t_k} \Phi(t_k, t) \mathbf{B}(t) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T(t) \Phi^T(t_k, t) dt \right] \mathbf{c}. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Обозначим

$$\mathbf{V}(t_0, t_k) = \int_{t_0}^{t_k} \Phi(t_k, t) \mathbf{B}(t) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T(t) \Phi^T(t_k, t) dt. \quad (2.8)$$

Матрица $\mathbf{V}(t_0, t_k)$ отличается от матрицы достижимости наличием положительно определенной весовой матрицы. Ввиду предполагаемой невырожденности матрицы достижимости матрица $\mathbf{V}(t_0, t_k)$ также не вырождена. Поэтому вектор констант \mathbf{c} определяется из системы линейных уравнений (2.7) единственным образом:

$$\mathbf{c} = \mathbf{V}^{-1}(t_0, t_k) [\mathbf{x}_k - \Phi(t_k, t_0) \mathbf{x}_0]. \quad (2.9)$$

Подстановка найденного вектора констант в выражение (2.5) завершает синтез закона разомкнутого управления в данной задаче:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}^{\text{раз}}(t) &= \\ &= \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T(t) \Phi^T(t_k, t) \mathbf{V}^{-1}(t_0, t_k) [\mathbf{x}_k - \Phi(t_k, t_0) \mathbf{x}_0]. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Закон управления (2.10) справедлив при любых начальных условиях \mathbf{x}_0 , определенных на момент времени t_0 . Поскольку любое текущее состояние $\mathbf{x}(t)$, отнесенное к текущему моменту времени t , можно интерпретировать как начальное на данный момент времени, закон управления (2.10) сохранит свою справедливость, если провести подстановку $t_0 \rightarrow t$, $\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}(t)$. В результате будет получен закон замкнутого управления системой (1.1), сформированный по принципу обратной связи и выраженный через параметры ее текущего состояния $\mathbf{x}(t)$:

$$\mathbf{u}^{\text{зам}}(t) = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T(t)\Phi^T(t_k, t)\mathbf{V}^{-1}(t, t_k)[\mathbf{x}_k - \Phi(t_k, t)\mathbf{x}(t)]. \quad (2.11)$$

Здесь матрица $\mathbf{V}(t, t_k)$, в отличие от матрицы $\mathbf{V}(t_0, t_k)$, определяется интегралом с переменным нижним пределом интегрирования:

$$\mathbf{V}(t, t_k) = \int_t^{t_k} \Phi(t_k, t)\mathbf{B}(t)\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T(t)\Phi^T(t_k, t)dt. \quad (2.12)$$

При реализации закона замкнутого управления (2.11) текущее состояние системы $\mathbf{x}(t)$ должно определяться в реальном масштабе времени с помощью соответствующей информационно-измерительной системы.

В частном случае стационарной системы (1.1) с постоянными матрицами \mathbf{A} и \mathbf{B} переходная матрица $\Phi(t_k, t)$ определяется как матричная экспонента: $\Phi(t_k, t) = \mathbf{e}^{\mathbf{A}\tau}$, где $\tau = t_k - t$. Здесь τ — время, оставшееся до завершения процесса управления. Подставим переходную матрицу $\Phi(t_k, t) = \mathbf{e}^{\mathbf{A}\tau}$ в формулу (2.12) и перейдем от переменной интегрирования t к переменной интегрирования τ . Полученную таким образом матрицу обозначим $\mathbf{V}(\tau)$:

$$\mathbf{V}(\tau) = \int_0^{\tau} \mathbf{e}^{\mathbf{A}\tau}\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{e}^{\mathbf{A}^T\tau} d\tau. \quad (2.13)$$

В итоге закон замкнутого управления (2.11) для стационарной системы будет иметь следующий вид:

$$\mathbf{u}^{\text{зам}}(\tau) = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{e}^{\mathbf{A}^T\tau}\mathbf{V}^{-1}(\tau)[\mathbf{x}_k - \mathbf{e}^{\mathbf{A}\tau}\mathbf{x}(\tau)]. \quad (2.14)$$

Выражения (2.11)—(2.12) и (2.13)—(2.14) представляют собой классические оптимальные законы замкнутого управления линейными нестационарными и стационарными системами, полученные методами аналитического конструирования терминальных регуляторов.

3. Синтез законов управления с учетом дополнительного краевого условия (1.5)

В основу решения задачи с нетрадиционным краевым условием (1.5) положим выражение (2.5)

для оптимального закона управления в предыдущей постановке задачи управления. Предварительно заметим, что столбцы матрицы $\mathbf{B}^T(t)\Phi^T(t_k, t)$ в (2.5) представляют собой вектор-функции влияния в рассматриваемой задаче управления. Данные функции характеризуют степень влияния вектора управляющих воздействий на каждую компоненту вектора параметров состояния динамической системы. Это видно из формулы Коши (2.6), где под интегралом стоит вектор, образованный скалярными произведениями функций влияния и вектора управлений. Из формулы Коши видно, что в линейной системе (1.1) порядка n имеется ровно n вектор-функций влияния. В соответствии с условием полной достижимости эти функции влияния линейно независимы. В справедливости последнего утверждения нетрудно убедиться, приняв во внимание, что матрица достижимости (1.2) может быть интерпретирована как матрица Грама, образованная парными скалярными произведениями вектор-функций влияния. Поэтому условие полной достижимости системы (1.1), сформулированное Р. Калманом как требование невырожденности матрицы (1.2), эквивалентно требованию линейной независимости функций влияния, гарантируемому в соответствии с известным критерием Грама линейной независимости элементов линейного пространства (см. [10], с. 225).

Итак, примем закон оптимального управления вида (2.5) в качестве основы для решения рассматриваемой задачи управления. Однако при записи закона управления по формуле (2.5) обеспечить одновременное выполнение краевых условий для параметров состояния и для управляющих воздействий невозможно, так как число степеней свободы вектора управлений, совпадающее с числом линейно независимых функций влияния и равное n , для этого недостаточно. Поэтому искусственно увеличим число степеней свободы вектора управлений, введя в (2.5) m дополнительных функций влияния в виде m векторных функций, записанных в виде столбцов размерности m .

Объединим введенные вектор-функции в квадратную матрицу порядка m и обозначим эту матрицу $\mathbf{F}(t)$. Для однозначного решения задачи управления вновь введенные функции влияния вместе с исходными функциями влияния должны образовывать линейно независимую совокупность функций. Искомый закон управления выразим в виде линейной комбинации исходных и вновь введенных функций влияния, сохранив в исходном законе управления обратную весовую матрицу. В матричной форме запису искомый закон управления примет вид

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T(t)\Phi^T(t_k, t)\mathbf{c}_1 + \mathbf{F}(t)\mathbf{c}_2. \quad (3.1)$$

Здесь \mathbf{c}_1 и \mathbf{c}_2 — векторы констант размерности n и m . В данной записи закона управления число его степеней свободы стало равным $n + m$.

Для получения окончательного выражения для искомого закона управления остается выразить векторные константы \mathbf{c}_1 и \mathbf{c}_2 через имеющиеся краевые условия. Снова воспользуемся формулой Коши и подставим в ее правую часть закон управления (3.1):

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_k &= \Phi(t_k, t)\mathbf{x}_0 + \\ &+ \left[\int_{t_0}^{t_k} \Phi(t_k, t)\mathbf{B}(t)\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T(t)\Phi^T(t_k, t)dt \right] \mathbf{c}_1 + \\ &+ \left[\int_{t_0}^{t_k} \Phi(t_k, t)\mathbf{B}(t)\mathbf{F}(t)dt \right] \mathbf{c}_2. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Матричный коэффициент при векторе \mathbf{c}_2 обозначим $\mathbf{W}(t_0, t_k)$ и перепишем уравнение (3.2) в виде

$$\mathbf{x}_k - \Phi(t_k, t_0)\mathbf{x}_0 = \mathbf{V}(t_0, t_k)\mathbf{c}_1 + \mathbf{W}(t_0, t_k)\mathbf{c}_2. \quad (3.3)$$

Учтем также краевое условие (1.5). Подставляя в (3.1) $t = t_k$ и принимая во внимание, что матрица $\Phi(t_k, t_k)$ равна единичной матрице, получаем

$$\mathbf{u}_k = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T(t_k)\mathbf{c}_1 + \mathbf{F}(t_k)\mathbf{c}_2. \quad (3.4)$$

Объединим уравнения (3.3) и (3.4) в единую систему алгебраических уравнений, применив блочно-матричную символику:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_k - \Phi(t_k, t_0)\mathbf{x}_0 \\ \mathbf{u}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}(t_0, t_k) & \mathbf{W}(t_0, t_k) \\ \mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T(t_k) & \mathbf{F}(t_k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{c}_1 \\ \mathbf{c}_2 \end{bmatrix}. \quad (3.5)$$

Рассмотрим матрицу этой системы уравнений:

$$\tilde{\mathbf{V}}(t_0, t_k) = \begin{bmatrix} \mathbf{V}(t_0, t_k) & \mathbf{W}(t_0, t_k) \\ \mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T(t_k) & \mathbf{F}(t_k) \end{bmatrix}. \quad (3.6)$$

Ввиду линейной независимости исходных и вновь введенных функций влияния матрица (3.6) не вырождена, и векторы констант \mathbf{c}_1 , \mathbf{c}_2 определяются из системы линейных алгебраических уравнений (3.5) единственным образом:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{c}_1 \\ \mathbf{c}_2 \end{bmatrix} = \tilde{\mathbf{V}}^{-1}(t_0, t_k) \begin{bmatrix} \mathbf{x}_k - \Phi(t_k, t_0)\mathbf{x}_0 \\ \mathbf{u}_k \end{bmatrix}.$$

Подставляя константы \mathbf{c}_1 и \mathbf{c}_2 в (3.4), получаем искомым закон разомкнутого управления:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}^{\text{раз}}(t) &= \\ &= [\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T(t)\Phi^T(t_k, t); \mathbf{F}(t)] \tilde{\mathbf{V}}^{-1}(t_0, t_k) \begin{bmatrix} \mathbf{x}_k - \Phi(t_k, t_0)\mathbf{x}_0 \\ \mathbf{u}_k \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Закон замкнутого управления, соответствующий разомкнутому закону (3.7), получается подстановкой $t_0 \rightarrow t$ и $\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}(t)$:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}^{\text{зам}}(t) &= \\ &= [\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T(t)\Phi^T(t_k, t); \mathbf{F}(t)] \tilde{\mathbf{V}}^{-1}(t, t_k) \begin{bmatrix} \mathbf{x}_k - \Phi(t_k, t)\mathbf{x}(t) \\ \mathbf{u}_k \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (3.8)$$

где матрица $\tilde{\mathbf{V}}(t, t_k)$ имеет согласно (3.6) вид:

$$\tilde{\mathbf{V}}(t, t_k) = \begin{bmatrix} \mathbf{V}(t, t_k) & \mathbf{W}(t, t_k) \\ \mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T(t_k) & \mathbf{F}(t_k) \end{bmatrix}. \quad (3.9)$$

Здесь матрица $\mathbf{W}(t, t_k)$, как и матрица $\mathbf{V}(t, t_k)$, определяется интегралом с переменным нижним пределом интегрирования:

$$\mathbf{W}(t, t_k) = \int_t^{t_k} \Phi(t_k, t)\mathbf{B}(t)\mathbf{F}(t)dt. \quad (3.10)$$

В частном случае стационарной системы переходная матрица выражается, как это было упомянуто выше, в виде матричной экспоненты $\Phi(t_k, t) = \mathbf{e}^{A\tau}$, где $\tau = t_k - t$. Обозначим матрицу (3.10) для стационарной системы $\mathbf{W}(\tau)$ и перейдем в (3.10) к переменной интегрирования τ . В результате получим следующее выражение для этой матрицы:

$$\mathbf{W}(\tau) = \int_t^{t_k} \mathbf{e}^{A\tau} \mathbf{B} \mathbf{F}(\tau) d\tau. \quad (3.11)$$

Матрицу $\tilde{\mathbf{V}}(t, t_k)$ обозначим $\tilde{\mathbf{V}}(\tau)$ и запишем, как и выше, в блочном виде:

$$\tilde{\mathbf{V}}(\tau) = \begin{bmatrix} \mathbf{V}(\tau) & \mathbf{W}(\tau) \\ \mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T & \mathbf{F}(0) \end{bmatrix}. \quad (3.12)$$

Заметим, что дополнительные функции влияния, образующие матрицу $\mathbf{F}(\tau)$, следует выразить через переменную τ , при этом запись $\mathbf{F}(0)$ в выражении (3.12) означает, что здесь фигурируют значения дополнительных функций влияния в терминальной точке, где $\tau = 0$.

Окончательно закон замкнутого управления стационарной системой принимает вид

$$\begin{aligned} \mathbf{u}^{\text{зам}}(t) &= \\ &= [\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T \mathbf{e}^{A^T \tau}; \mathbf{F}(\tau)] \tilde{\mathbf{V}}^{-1}(\tau) \begin{bmatrix} \mathbf{x}_k - \mathbf{e}^{A^T \tau} \mathbf{x}(\tau) \\ \mathbf{u}_k \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (3.13)$$

4. Синтез законов управления с учетом двух дополнительных краевых условий (1.5) и (1.6)

Способ решения задачи синтеза управлений остается прежним — в выражение для закона управления (3.1) следует ввести дополнительные функции влияния, необходимые для реализации дополнительного краевого условия (1.6):

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T(t)\Phi^T(t_k, t)\mathbf{c}_1 + \mathbf{F}_1(t)\mathbf{c}_2 + \mathbf{F}_2(t)\mathbf{c}_3. \quad (4.1)$$

Здесь $\mathbf{F}_1(t)$ и $\mathbf{F}_2(t)$ — квадратные матрицы порядка m , столбцы которых линейно независимы со столбцами матрицы $\mathbf{B}^T(t)\Phi^T(t_k, t)$. Константы \mathbf{c}_1 , \mathbf{c}_2 , \mathbf{c}_3 определяются, подобно предыдущему, по крайевым условиям \mathbf{x}_0 , \mathbf{x}_k , \mathbf{u}_k , $\dot{\mathbf{u}}_k$.

Воспользуемся, как и ранее, формулой Коши:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_k - \Phi(t_k, t)\mathbf{x}_0 = \\ = \mathbf{V}(t_0, t_k)\mathbf{c}_1 + \mathbf{W}_1(t_0, t_k)\mathbf{c}_2 + \mathbf{W}_2(t_0, t_k)\mathbf{c}_3. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Здесь матрица $\mathbf{V}(t_0, t_k)$ определена формулой (2.8), а матрицы $\mathbf{W}_1(t_0, t_k)$ и $\mathbf{W}_2(t_0, t_k)$ задаются выражениями

$$\mathbf{W}_i(t_0, t_k) = \int_{t_0}^{t_k} \Phi(t_k, t)\mathbf{B}(t)\mathbf{F}_i(t)dt, \quad i = 1, 2. \quad (4.3)$$

Положив в законе управления (4.1) $t = t_k$, получим с учетом краевого условия (1.5) второе матричное уравнение для констант \mathbf{c}_1 , \mathbf{c}_2 и \mathbf{c}_3 :

$$\mathbf{u}_k = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T(t_k)\mathbf{c}_1 + \mathbf{F}_1(t_k)\mathbf{c}_2 + \mathbf{F}_2(t_k)\mathbf{c}_3. \quad (4.4)$$

Для учета краевого условия (1.6) продифференцируем закон управления (4.1) по времени:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{u}}(t) = \mathbf{R}^{-1}[\dot{\mathbf{B}}^T(t)\Phi^T(t_k, t) + \\ + \mathbf{B}^T(t)\dot{\Phi}^T(t_k, t)]\mathbf{c}_1 + \dot{\mathbf{F}}_1(t)\mathbf{c}_2 + \dot{\mathbf{F}}_2(t)\mathbf{c}_3, \end{aligned} \quad (4.5)$$

где $\dot{\mathbf{B}}$, $\dot{\Phi}$, $\dot{\mathbf{F}}_1$ и $\dot{\mathbf{F}}_2$ — производные соответствующих матриц. Матрица $\Phi^T(t_k, t)$ удовлетворяет сопряженному уравнению (2.2)

$$\dot{\Phi}^T(t_k, t) = -\mathbf{A}^T(t)\Phi^T(t_k, t). \quad (4.6)$$

Подставим в (4.5) равенство (4.6) и при $t = t_k$ с учетом краевого условия (1.6) получим третье матричное уравнение для констант \mathbf{c}_1 , \mathbf{c}_2 и \mathbf{c}_3 :

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{u}}_k = \mathbf{R}^{-1}[\dot{\mathbf{B}}^T(t_k) - \mathbf{B}^T(t_k)\mathbf{A}^T(t_k)]\mathbf{c}_1 + \\ + \dot{\mathbf{F}}_1(t_k)\mathbf{c}_2 + \dot{\mathbf{F}}_2(t_k)\mathbf{c}_3. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Объединим уравнения (4.2), (4.4) и (4.7) в единую систему уравнений с матрицей $\tilde{\mathbf{V}}(t_0, t_k)$:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_k - \Phi(t_k, t)\mathbf{x}_0 \\ \mathbf{u}_k \\ \dot{\mathbf{u}}_k \end{bmatrix} = \tilde{\mathbf{V}}(t_0, t_k) \begin{bmatrix} \mathbf{c}_1 \\ \mathbf{c}_2 \\ \mathbf{c}_3 \end{bmatrix}, \quad (4.8)$$

$$\tilde{\mathbf{V}} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}(t_0, t_k) & \mathbf{W}_1(t_0, t_k) & \mathbf{W}_2(t_0, t_k) \\ \mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T(t_k) & \mathbf{F}_1(t_k) & \mathbf{F}_2(t_k) \\ \mathbf{R}^{-1}[\dot{\mathbf{B}}^T - \mathbf{B}^T\mathbf{A}^T] & \dot{\mathbf{F}}_1(t_k) & \dot{\mathbf{F}}_2(t_k) \end{bmatrix}.$$

Здесь $\dot{\mathbf{F}}_1(t_k)$ и $\dot{\mathbf{F}}_2(t_k)$ — производные по времени от матриц \mathbf{F}_1 и \mathbf{F}_2 , вычисленные при $t = t_k$. Матрица $\tilde{\mathbf{V}}(t_0, t_k)$ не вырождена, так как дополнительные функции влияния, образующие столбцы матриц $\mathbf{F}_1(t)$ и $\mathbf{F}_2(t)$, выбираются так, чтобы совместно со столбцами матрицы $\mathbf{B}^T(t)\Phi^T(t_k, t)$ они образовали линейно независимую совокупность функций. Вследствие этого система уравнений (4.8) имеет единственное решение:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{c}_1 \\ \mathbf{c}_2 \\ \mathbf{c}_3 \end{bmatrix} = \tilde{\mathbf{V}}^{-1}(t_0, t_k) \begin{bmatrix} \mathbf{x}_k - \Phi(t_k, t)\mathbf{x}_0 \\ \mathbf{u}_k \\ \dot{\mathbf{u}}_k \end{bmatrix}. \quad (4.9)$$

Теперь по формуле (4.1) получим закон разомкнутого управления:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}^{\text{раз}}(t) = [\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T(t)\Phi^T(t_k, t) \quad \mathbf{F}_1(t) \quad \mathbf{F}_2(t)] \times \\ \times \tilde{\mathbf{V}}^{-1}(t_0, t_k) \begin{bmatrix} \mathbf{x}_k - \Phi(t_k, t)\mathbf{x}_0 \\ \mathbf{u}_k \\ \dot{\mathbf{u}}_k \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Закон замкнутого управления получается из (4.10) подстановкой $t_0 \rightarrow t$ и $\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}(t)$. Приведем его выражение для стационарной системы:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}^{\text{зам}}(t) = [\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{e}^{\mathbf{A}^T\tau} \quad \mathbf{F}_1(\tau) \quad \mathbf{F}_2(\tau)] \times \\ \times \tilde{\mathbf{V}}^{-1}(\tau) \begin{bmatrix} \mathbf{x}_k - \mathbf{e}^{\mathbf{A}\tau}\mathbf{x}(\tau) \\ \mathbf{u}_k \\ \dot{\mathbf{u}}_k \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (4.11)$$

где матрица $\tilde{\mathbf{V}}(\tau)$ определена выражениями

$$\tilde{\mathbf{V}}(\tau) = \begin{bmatrix} \mathbf{V}(\tau) & \mathbf{W}_1(\tau) & \mathbf{W}_2(\tau) \\ \mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T & \mathbf{F}_1(0) & \mathbf{F}_2(0) \\ -\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{A}^T & \dot{\mathbf{F}}_1(0) & \dot{\mathbf{F}}_2(0) \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{W}_i(\tau) = \int_0^\tau \mathbf{e}^{\mathbf{A}\tau}\mathbf{B}\mathbf{F}_i(\tau)d\tau; i = 1, 2. \quad (4.12)$$

В формулах (4.12) учтено, что для стационарной системы матрицы $\mathbf{F}_1(\tau)$ и $\mathbf{F}_2(\tau)$ дополнительных функций влияния вводятся как функции переменной τ , при этом в выражении для матрицы $\tilde{\mathbf{V}}(\tau)$ фигурируют значения этих матриц и их производных, вычисленные в конечный момент времени при $\tau = 0$.

Нами рассмотрен метод синтеза законов управления при задании краевых условий (1.4) для вектора состояний динамической системы и краевых условий (1.5), (1.6) для вектора управлений. Для решения задачи управления с краевыми условиями (1.4)–(1.8) трансформированный закон управления записывается по аналогии с (4.1) в общем виде:

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T(t)\Phi^T(t_k, t)\mathbf{c}_1 + \sum_{i=1}^{l+1} \mathbf{F}_i(t)\mathbf{c}_i + 1,$$

где $\mathbf{F}_1(t), \dots, \mathbf{F}_{l+1}(t)$ — квадратные матрицы порядка m , образованные дополнительными функциями влияния. Векторы констант $\mathbf{c}_1, \dots, \mathbf{c}_{l+1}$ определяются здесь по общей совокупности краевых условий (1.4)–(1.8).

5. Иллюстративные примеры

Рассмотрим систему второго порядка, примененную в [1] для построения законов "мягкого" и "сверхмягкого" управления:

$$\dot{x} = V, \quad \dot{V} = u. \quad (5.1)$$

Здесь x — координата управляемого объекта, V — его скорость, u — управляющее ускорение. Несмотря на простоту, система (5.1) находит многочисленные применения в качестве модели управляемого процесса при построении законов управления различными объектами. Например, в [3] данная модель использовалась для описания вращательного движения гиросtabilизированной платформы вокруг одной из осей стабилизации; в [5] данная модель применялась для построения программ требуемых ускорений в алгоритмах наведения спускаемого аэробаллистического летательного аппарата по методу решения обратной задачи динамики и т. д. Воспользуемся данной моделью для иллюстрации техники применения изложенного выше метода синтеза законов "мягкого" и "сверхмягкого" управле-

ния. Обозначим параметры начального состояния объекта управления в начальный момент времени $t_0 = 0$ как x_0, V_0 и параметры конечного состояния в терминальный момент времени t_k как x_k, V_k .

Поставим задачу синтеза законов управления системой (5.1) для следующих вариантов краевых условий:

Вариант 1. Заданы краевые условия только для параметров состояния системы, т. е. для координаты и скорости:

$$\begin{aligned} x(t_0) &= x_0, \quad V(t_0) = V_0; \\ x(t_k) &= x_k, \quad V(t_k) = V_k. \end{aligned} \quad (5.2)$$

Вариант 2. В дополнение к условиям (5.2) задано краевое условие вида (1.5) для управляющего ускорения: $u(t_k) = u_k$.

Вариант 3. В дополнение к условиям (5.2) заданы краевые условия вида (1.5) и (1.6) для управляющего ускорения и его производной: $u(t_k) = u_k, \dot{u}(t_k) = \dot{u}_k$. Законы разомкнутого управления в данных вариантах задачи управления обозначим $u_1^{\text{раз}}(t), u_2^{\text{раз}}(t), u_3^{\text{раз}}(t)$ и соответствующие им законы замкнутого управления обозначим $u_1^{\text{зам}}(t), u_2^{\text{зам}}(t), u_3^{\text{зам}}(t)$. Приведем решения задач синтеза законов замкнутого управления для перечисленных вариантов.

Решение задачи в варианте 1.

Матрицы \mathbf{A} и \mathbf{B} для системы (5.1) имеют вид:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (5.3)$$

Известно (см. [10], с. 118), что матричная экспонента $\mathbf{e}^{\mathbf{A}t}$ выражается матричным рядом, где \mathbf{E}_n — единичная матрица n -го порядка:

$$\mathbf{e}^{\mathbf{A}t} = \mathbf{E}_n + \mathbf{A}t + \frac{1}{2!}\mathbf{A}^2t^2 + \dots \quad (5.4)$$

Поскольку вторая и последующие степени рассматриваемой матрицы \mathbf{A} равны нулевой матрице, нетрудно вычислить переходную матрицу системы (5.1) как сумму двух первых членов ряда (5.4):

$$\begin{aligned} \Phi(t_k, t) &= \mathbf{e}^{\mathbf{A}\tau} = \mathbf{E}_2 + \mathbf{A}\tau = \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}\tau = \begin{bmatrix} 1 & \tau \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (5.5)$$

Запишем также матрицу функций влияния в системе (5.1):

$$\mathbf{B}^T\mathbf{e}^{\mathbf{A}\tau} = [\tau \ ; \ 1]. \quad (5.6)$$

Как видим, здесь имеются две скалярные функции влияния: τ и 1. Ввиду линейной независимости

этих функций влияния система (5.1) полностью достижима в ее фазовом пространстве.

Вычислим далее матрицу $\mathbf{V}(\tau)$ вида (2.13) с учетом $R = 1$ и обратим ее:

$$\mathbf{V}(\tau) = \int_0^\tau \begin{bmatrix} \tau \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau & 1 \end{bmatrix} dt = \begin{bmatrix} \frac{\tau^3}{3} & \frac{\tau^2}{2} \\ \frac{\tau^2}{2} & \tau \end{bmatrix}; \mathbf{V}^{-1}(\tau) = \begin{bmatrix} \frac{12}{\tau^3} & -\frac{6}{\tau^2} \\ -\frac{6}{\tau^2} & \frac{4}{\tau} \end{bmatrix}. \quad (5.7)$$

Теперь по формуле (2.14) получим закон замкнутого управления:

$$u_1^{\text{зам}}(\tau) = \frac{6[x_k - x(\tau)]}{\tau^2} - \frac{2V_k + 4V(\tau)}{\tau}.$$

Осуществим в последней формуле обратную замену независимой переменной $\tau = t_k - t$ и выразим найденный закон управления в функции текущего времени:

$$u_1^{\text{зам}}(t) = \frac{6[x_k - x(t)]}{(t_k - t)^2} - \frac{2V_k + 4V(t)}{t_k - t}. \quad (5.8)$$

Решение задачи в варианте 2. Воспользуемся формулами (3.12)—(3.13). Предварительно надо ввести одну дополнительную функцию влияния. Как видно из (5.6), исходными функциями влияния являются здесь функции τ и 1. Выберем в качестве дополнительной функции влияния, линейно независимой с τ и 1, функцию τ^2 . Таким образом, в рассматриваемом случае матрица $\mathbf{F}(\tau)$ дополнительных функций влияния есть скаляр: $F(\tau) = \tau^2$. Вычислим матрицу $\mathbf{W}(\tau)$:

$$\mathbf{W}(\tau) = \int_0^\tau \mathbf{e}^{A\tau} \mathbf{B} \mathbf{F}(\tau) d\tau = \int_0^\tau \begin{bmatrix} \tau \\ 1 \end{bmatrix} \tau^2 d\tau = \begin{bmatrix} \tau^4/4 \\ \tau^3/3 \end{bmatrix}.$$

Матрица $\mathbf{V}(\tau)$ была вычислена ранее (формула (5.7)). Запишем выражение для матрицы $\tilde{\mathbf{V}}(\tau)$ вида (3.12) и найдем обратную матрицу:

$$\tilde{\mathbf{V}}(\tau) = \begin{bmatrix} \mathbf{V}(\tau) & \mathbf{W}(\tau) \\ \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T & \mathbf{F}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau^3/3 & \tau^2/2 & \tau^4/4 \\ \tau^2/2 & \tau & \tau^3/3 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\tilde{\mathbf{V}}^{-1}(\tau) = \begin{bmatrix} -\frac{24}{\tau^3} & \frac{18}{\tau^2} & -\frac{6}{\tau} \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{36}{\tau^4} & -\frac{24}{\tau^3} & \frac{6}{\tau^2} \end{bmatrix}.$$

Теперь по формуле (3.13) получаем:

$$u_2^{\text{зам}}(\tau) = \frac{12[x_k - x(\tau)]}{\tau^2} - \frac{6V_k + 6V(\tau)}{\tau} + u_k.$$

Сделаем здесь обратную подстановку $\tau = t_k - t$ и получим выражение для закона управления в функции текущего времени:

$$u_2^{\text{зам}}(t) = \frac{12[x_k - x(t)]}{(t_k - t)^2} - \frac{6V_k + 6V(t)}{t_k - t} + u_k. \quad (5.9)$$

Решение задачи в варианте 3. Воспользуемся выражениями (4.11)—(4.12). В дополнение к функциям влияния τ , 1, τ^2 , рассмотренным в предыдущем варианте задачи, введем еще одну функцию влияния τ^3 . Таким образом, здесь $F_1(\tau) = \tau^2$, $F_2(\tau) = \tau^3$. Матрицы $\mathbf{V}(\tau)$ и $\mathbf{W}_1(\tau)$ остаются теми же, как и в предыдущей задаче. Вычислим матрицу $\mathbf{W}_2(\tau)$:

$$\mathbf{W}_2(\tau) = \int_0^\tau \mathbf{e}^{A\tau} \mathbf{B} \mathbf{F}_2(\tau) d\tau = \int_0^\tau \begin{bmatrix} \tau \\ 1 \end{bmatrix} \tau^3 d\tau = \begin{bmatrix} \tau^5/5 \\ \tau^4/4 \end{bmatrix}.$$

В соответствии с определением матриц \mathbf{F}_1 и \mathbf{F}_2 в данном случае имеем:

$$F_1(0) = F_2(0) = \dot{F}_1(0) \dot{F}_2(0) = 0.$$

Таким образом, матрица $\tilde{\tilde{\mathbf{V}}}(\tau)$ и обратная матрица $\tilde{\tilde{\mathbf{V}}}^{-1}(\tau)$ имеют вид

$$\tilde{\tilde{\mathbf{V}}}(\tau) = \begin{bmatrix} \tau^3 & \tau^2 & \tau^4 & \tau^5 \\ \tau^2 & \tau & \tau^3 & \tau^4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \tilde{\tilde{\mathbf{V}}}^{-1}(\tau) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{60}{\tau^4} & \frac{48}{\tau^3} & -\frac{18}{\tau^2} & \frac{4}{\tau} \\ \frac{80}{\tau^5} & -\frac{60}{\tau^4} & \frac{20}{\tau^3} & -\frac{10}{3\tau^2} \end{bmatrix}.$$

Воспользуемся формулой (4.12) и получим закон замкнутого управления:

$$u_3^{\text{зам}}(\tau) = \frac{20[x_k - x(\tau)]}{\tau^2} - \frac{12V_k + 8V(\tau)}{\tau} + 3u_k - \frac{\tau}{3} \dot{u}_k.$$

Осуществим здесь обратную подстановку $\tau = t_k - t$ и выразим закон управления в функции текущего времени:

$$u_3^{\text{зам}}(t) = \frac{20[x_k - x(t)]}{(t_k - t)^2} - \frac{12V_k + 8V(t)}{t_k - t} + 3u_k - \frac{t_k - t}{3} \dot{u}_k. \quad (5.10)$$

Приведем без выкладок законы разомкнутого управления в рассмотренных вариантах задачи управления, полученные по формулам (2.10), (3.7) и (4.11). В целях упрощения приводимых выражений ограничимся частным случаем, когда конечные значения параметров состояния системы полагаются нулевыми ($x_k = 0$, $V_k = 0$):

$$u_1^{\text{раз}}(t) = -\frac{6x_0}{t_k^2} - \frac{4V_0}{t_k} + \left(\frac{12x_0}{t_k^3} + \frac{6V_0}{t_k^2}\right)t; \quad (5.11)$$

$$u_2^{\text{раз}}(t) = -\frac{12x_0}{t_k^2} - \frac{6V_0}{t_k} + \left(\frac{48x_0}{t_k^3} + \frac{18V_0}{t_k^2}\right)t - \left(\frac{36x_0}{t_k^4} + \frac{12V_0}{t_k^3}\right)t^2 + \left(1 - \frac{6t}{t_k} + \frac{6t^2}{t_k^2}\right)u_k; \quad (5.12)$$

$$u_3^{\text{раз}}(t) = -\frac{20x_0}{t_k^2} - \frac{8V_0}{t_k} + \left(\frac{120x_0}{t_k^3} + \frac{36V_0}{t_k^2}\right)t - \left(\frac{180x_0}{t_k^4} + \frac{48V_0}{t_k^3}\right)t^2 + \left(\frac{80x_0}{t_k^5} + \frac{20V_0}{t_k^4}\right)t^3 + \left(3 - \frac{24t}{t_k} + \frac{42t^2}{t_k^2} - \frac{20t^3}{t_k^3}\right)u_k - \left(\frac{t_k}{3} - 3t + \frac{6t^2}{t_k} - \frac{10t^3}{3t_k^2}\right)\dot{u}_k. \quad (5.13)$$

Можно убедиться прямой проверкой, что закон (5.12) удовлетворяет конечному условию $u_2^{\text{раз}}(t_k) = u_k$, а закон (5.13) удовлетворяет конечным условиям $u_3^{\text{раз}}(t_k) = u_k$, $\dot{u}_3^{\text{раз}}(t_k) = \dot{u}_k$.

Среди перечисленных законов оптимальными по критерию (1.9) являются только законы $u_1^{\text{раз}}(t)$ и $u_1^{\text{зам}}(t)$, так как они получены согласно процедуре принципа максимума. Другие приведенные здесь законы не оптимальны. Их можно назвать квази-оптимальными, так как они получены трансформацией оптимальных законов путем введения дополнительных функций влияния.

Отметим, что законы (5.8)—(5.13) в системе второго порядка (5.1) были ранее опубликованы в [1], однако там они были получены путем непосредственного задания программ управления в виде степенных полиномов времени с последующим интегрированием уравнений (5.1) с учетом краевых условий. Здесь же эти законы получены в рамках общего метода синтеза управлений.

Подведем итог: получены три варианта законов замкнутого управления: (5.8), (5.9) и (5.10). Если

принять здесь терминальные значения управляющего ускорения u_k и его производной \dot{u}_k нулевыми, то данные законы примут вид

$$u_1^{\text{зам}}(t) = \frac{6[x_k - x(t)]}{(t_k - t)^2} - \frac{2V_k + 4V(t)}{t_k - t}; \quad (5.14)$$

$$u_2^{\text{зам}}(t) = \frac{12[x_k - x(t)]}{(t_k - t)^2} - \frac{6V_k + 6V(t)}{t_k - t}; \quad (5.15)$$

$$u_3^{\text{зам}}(t) = \frac{20[x_k - x(t)]}{(t_k - t)^2} - \frac{12V_k + 8V(t)}{t_k - t}. \quad (5.16)$$

Как видим, данные законы имеют одинаковую структуру, различаясь лишь коэффициентами, тогда как соответствующие им законы разомкнутого управления выражаются полиномами различной степени по переменной t . По своему построению закон (5.14) оптимален по критерию (1.9). Законы (5.15) и (5.16) не оптимальны, однако закон (5.15) обеспечивает "мягкое" управление конечным состоянием системы (5.1) при соблюдении условия $u_2^{\text{зам}}(t_k) = 0$, а закон (5.16) обеспечивает "сверхмягкое" управление конечным состоянием этой системы при соблюдении условий $u_3^{\text{зам}}(t_k) = \dot{u}_3^{\text{зам}}(t_k) = 0$. Таким образом, потеря данными законами управления свойства оптимальности компенсируется приобретением нового качества — способностью обеспечивать мягкость и сверхмягкость управления.

Законы управления (5.14)—(5.16) можно выразить общей зависимостью

$$u^{\text{зам}}(t) = \frac{(2 + 3k + k^2)[x_k - x(t)]}{(t_k - t)^2} - \frac{(k + k^2)V_k + 2(1 + k)V(t)}{t_k - t}, \quad (5.17)$$

где k — степень полинома в соответствующем законе разомкнутого управления, а значения управляющего ускорения и всех его последовательных производных до порядка $k - 2$ включительно полагаются равными нулю в терминальный момент времени.

Таким образом, получено семейство законов замкнутого управления (5.17), обеспечивающих решение задачи управления конечным состоянием системы (5.1) при соблюдении требования "мягкости" управления при $k = 2$ и "сверхмягкости" управления любого порядка $l = k - 2$ при $k > 2$.

В [5] показана целесообразность применения законов (5.17) в качестве замкнутых программ требуемых ускорений в алгоритмах наведения спус-

каемого аэробаллистического летательного аппарата в заданную точку земной поверхности, синтезированных по методу решения обратной задачи динамики. Применение законов управления вида (5.17) обеспечивает высокую точность попадания ЛА в точку цели. Кроме того, как видно из выражения (5.17), увеличение параметра k приводит к увеличению программных ускорений и, следовательно, к увеличению перегрузок, действующих на ЛА в процессе наведения. Это свойство законов управления может оказаться полезным в задачах противодействия перехвату ЛА.

Заключение

1. Изложенный метод позволяет успешно решать задачи синтеза законов "мягкого" и "сверхмягкого" управления конечным состоянием линейных или линеаризованных динамических систем. Данный метод синтеза нетрудно обобщить на задачи, где требуемые значения управляющих воздействий задаются не только в терминальный, но и в начальный момент времени, т. е. на левом конце интервала управляемого движения.

2. Законы "мягкого" и "сверхмягкого" управления, получаемые в рамках изложенной процедуры синтеза путем трансформации исходного закона управления, оптимального по критерию вида (1.9), не оптимальны по данному критерию. В связи с этим может быть поставлена новая задача теории оптимального управления — поиск путей решения задач управления с нетрадиционными краевыми условиями типа (1.5)—(1.8), которые приводили бы к законам "мягкого" и "сверхмягкого" управления, строго оптимальным по тому или иному критерию.

3. Законы управления, получаемые в соответствии с изложенным способом синтеза, не единственны, так как дополнительные функции влияния, вводимые в исходный оптимальный закон управления, могут задаваться по-разному при соблюдении единственного требования линейной независимости между собой и с исходными функциями влияния. В связи с этим существует возможность выбора наилучшей в некотором смысле совокупности дополнительных функций влияния, например, по критерию минимума вычислительных затрат, требуемых на реализацию получаемых законов управления в бортовой ЦВМ.

Список литературы

1. Батенко А. П. Управление конечным состоянием движущихся объектов. М.: Сов. радио, 1977.
2. Петров Б. Н., Крутько П. Д. Конструирование алгоритмов управления полетом на основе решения обратных задач динамики // Изв. АН СССР. Сер. "Техническая кибернетика". 1981. № 2, С. 162—170. № 3. С. 161—172.
3. Никифоров В. М., Сапожников А. И., Вязов С. М. Аналитическое конструирование терминального регулятора динамических систем управления согласно векторно-матричному методу В. Н. Бородовского // Тр. ФГУП "НПЦ АП им. акад. Н. А. Пилюгина". Системы и приборы управления. 2008. № 2(4). С. 60—75.
4. Бородовский В. Н., Никифоров В. М. Терминальное управление процессом начальной выставки гироплатформы летательного аппарата в горизонт. МАК-2000. М., 2000.
5. Разоренов Г. Н., Бахрамов Э. А., Титов Ю. Ф. Системы управления летательными аппаратами. М.: Машиностроение, 2003.
6. Разоренов Г. Н., Самарин А. А. Теория и системы оптимального управления. М.: МО, 2007.
7. Калман Р., Фалб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем. М.: Мир, 1971.
8. Понтрягин Л. С. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1976.
9. Хартман Ф. Обыкновенные дифференциальные уравнения. М.: Мир, 1970.
10. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. М.: Наука, 1967.

ИНФОРМАЦИЯ

3—8 октября 2011 г.
в пос. Дивноморское Геленджикского района состоится

4-я Всероссийская мультиконференция ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ (МКПУ-2011)

Председатель Президиума мультиконференции — академик РАН В. Г. Пешехонов

Состав мультиконференции

- ♦ Локальная научно-техническая конференция
"Искусственный интеллект и управление" (ИИУ-2011)
Председатель программного комитета конференции — академик РАН С. Н. Васильев
- ♦ Локальная научно-техническая конференция
"Мехатроника и эргатические системы" (МЭС-2011)
Председатель программного комитета конференции — член-корреспондент РАН Е. Д. Теряев
- ♦ Локальная научно-техническая конференция
"Управление в распределенных сетевых и мультиагентных системах" (УРСИМС-2011)
Сопредседатели программного комитета конференции: член-корреспондент РАН И. А. Каляев
член-корреспондент РАН Р. М. Юсупов

Подробная информация о мультиконференции и условиях участия в ней размещается на сайте:
<http://www.mvs.tsure.ru>

И. Б. Фуртат, канд. техн. наук, доц.
Астраханский государственный
технический университет,
Институт проблем машиноведения РАН,
г. Санкт-Петербург,
cainenash@mail.ru

Консенсусное управление линейной динамической сетью по выходу с компенсацией возмущений¹

Рассмотрена задача робастного управления линейной динамической сетью по выходу. При решении рассматривался орграф, где каждая его вершина ассоциирована с соответствующим узлом сети, который описывается априорно, параметрически и функционально неопределенным линейным дифференциальным уравнением с запаздыванием по состоянию. Вводится понятие ε -консенсуса. Получены алгоритмы децентрализованного управления, обеспечивающие ε -консенсус сети и компенсирующие неизвестные возмущения с требуемой точностью. Показано, что предложенная схема справедлива и для сети, идентифицированной с графом. Аналитические результаты проиллюстрированы на численном примере сети, состоящей из четырех узлов.

Ключевые слова: динамическая сеть, орграф, граф, консенсусное управление, компенсация возмущений

Введение. В последнее время наблюдается повышенный интерес к проблемам управления мультиагентными системами [1, 2]. Кооперативное управление различного рода объектами привлекало внимание исследователей во многих областях: биологии, физике, робототехнике, телекоммуникационных сетей и т. п. Одним из способов управления мультиагентными системами является консенсусное управление, цель которого состоит в поиске управляющего устройства, способного синхронизировать узлы сети, в которой нет лидера. При этом траектории всех узлов стремятся к некоторой общей величине, зависящей от параметров подсистем и межузловых связей.

В статье [3] для обеспечения консенсуса в мультиагентных системах с измеряемым вектором состояния подсистем предложен статический закон управления. При измерении векторного выхода в системе управления вводится наблюдатель, на базе оценок которого формируется закон регулирования. Получены условия расчета настраиваемых параметров в регуляторе, учитывающие топологию графа и орграфа сети. В работе [4] предлагаются динамические законы консенсусного управления мультиагентными системами в предположении, что изме-

рению доступны векторные входы и выходы каждой подсистемы. Решение базируется на методе H^∞ -управления. Однако для расчета параметров регулятора необходимо решить матричное уравнение Риккати, зависящее от параметров узлов сети, что неприемлемо в случае неопределенных агентов. В [5] рассмотрено консенсусное оптимальное управление динамическими сетями, где каждый узел описан двойным интегратором и измерению доступен вектор состояния. Для решения формируется расширенная система, включающая в себя все узлы сети. Затем, используя классические процедуры оптимального управления, рассчитывается регулирующий сигнал. В [6] для реализации консенсуса в мультиагентных системах по векторному выходу, представленным сетью интеграторов, используется наблюдатель с большим коэффициентом усиления. Впервые статическое консенсусное управление по выходу агентами произвольного порядка было исследовано в [7]. Для решения задачи использовалась теорема о пассивации [8] и результаты работы [3].

Как правило, в вышеперечисленных работах не рассматриваются вопросы управления мультиагентными системами, когда измерению доступны только скалярные выходы ее узлов. Кроме того, в этих работах рассматривался класс идентичных объектов. Поэтому возникает интерес к решению задачи консенсусного управления динамической сетью с частично неидентичными узлами и компенсации внутренних и внешних возмущений за конечное время с заданной точностью.

В данной статье предложено робастное децентрализованное управление динамической сетью, где каждый ее узел описан линейным априорно, параметрически и функционально неопределенным линейным дифференциальным уравнением с запаздыванием по состоянию. При решении предполагается, что измерению доступны только скалярные выходы локальных подсистем. Вначале задается орграф, каждая вершина которого ассоциирована с соответствующей подсистемой сети, что позволяет учесть ее топологию и, тем самым, значительно упростить реализацию системы управления. Для компенсации неконтролируемых возмущений используется подход, предложенный в [9]. В результате полученная система управления обеспечивает ε -консенсус в сети с требуемой точностью. Показано, что результаты, предложенные для сети, ассоциированной с орграфом, справедливы и для сети, идентифицированной с графом.

Постановка задачи. Рассмотрим орграф $\Gamma = (V, E)$, описывающий сеть S , причем каждая вершина орграфа Γ ассоциирована с подсистемой S_i , $i = 1, \dots, k$, где $V = \{v_1, \dots, v_k\}$ — множество вершин, $E \subseteq V \times V$ — множество ребер. Пусть $C = (c_{ij}) \in R^{n \times n}$ — матрица смежности орграфа Γ такая, что $c_{ij} = 1$, если $j \in N_j$, иначе $c_{ij} = 0$, $N_j = \{v_j \in V : (v_j, v_i) \in E\}$ — множество

¹ Работа выполнена в Институте проблем машиноведения РАН (г. Санкт-Петербург) при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 09-08-00237, 10-08-90707).

смежных вершин для узла v_i . Запись $(v_j, v_i) \in E$ означает, что информация поступает от подсистемы S_i к подсистеме S_j [10]. Будем полагать, что орграф Γ содержит ориентированное остовное дерево, где под ориентированным остовным деревом понимается ориентированное дерево, составленное из ребер орграфа Γ такое, что в нем существует путь из корня в любую другую вершину [10, 11].

Так, в мультиагентных системах вершина v_i определяет i -го агента, а ребро $(v_i, v_j) \in E$ — информацию, которую передает агент j агенту i .

Пусть подсистема (агент), соответствующая i -й вершине орграфа Γ сети S , описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= Ax_i(t) + Fx_i(t - h(t)) + B_i u_i(t) + D_i f_i(t), \\ y_i(t) &= Lx_i(t), \quad x_i(0) = x_{0i}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $x_i(t) \in R^n$ — вектор состояния i -й подсистемы; $u_i(t), f_i(t)$ и $y_i(t)$ — скалярные вход, внешнее неконтролируемое возмущение и выход соответственно; элементы матриц $A \in R^{n \times n}$, $F \in R^{n \times n}$, $B_i \in R^n$, $D_i \in R^n$ — неизвестные числа; $L = [1, 0, \dots, 0] \in R^{1 \times n}$; $h(t) > 0$ — неизвестное время запаздывания, $dh(t)/dt < 1$; x_{0i} — неизвестные начальные условия.

Требуется спроектировать систему ε -синхронизации [12] узлов сети S с достаточной точностью, т. е. обеспечить выполнение целевого неравенства

$$|\tilde{y}_{ij}(t)| = |y_i(t) - y_j(t)| < \varepsilon \quad (2)$$

по истечению времени $t = T$, где ε — заданное число. Выполнение условия (2) будем называть ε -консенсусом. Решим сформулированную задачу при следующих предположениях.

Предположения:

1. Орграф Γ содержит ориентированное остовное дерево.

2. Неизвестные элементы матриц A, F, B_i, D_i и начальные условия x_{0i} принадлежат известному ограниченному множеству возможных значений Ξ .

3. Пары (A, B_i) — управляемы и пара (L, A) — наблюдаема.

4. Выполнены условия структурного согласования: $A = A_N + B_N c^T$, $F = B_N \vartheta^T$, $B_i = B_N + B_N \tau_i$, $D_i = B_N k_i$, где $A_N \in R^{n \times n}$, $B_N \in R^n$ — известные номинальные постоянные матрицы, причем A_N — гурвицева, $c \in R^n$, $\vartheta \in R^n$, $\tau_i \in R$, $k_i \in R$ — известные векторы и числа.

5. Объект управления (1) — минимально фазовый, и последние элементы матриц B_i, B_N — положительные числа.

6. Внешние воздействия $f_i(t)$ — неизвестные ограниченные функции.

7. В системе управления доступны измерению только сигналы $y_i(t)$ и $u_i(t)$.

Метод решения. Воспользовавшись предположением 4, составим уравнение для ошибки $\tilde{y}_i(t) = \sum_{j \in N_j} \tilde{y}_{ij}(t) = \sum_{j \in N_j} (y_i(t) - y_j(t))$:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}_i(t) &= A_N \tilde{x}_i(t) + B_N \sum_{j \in N_j} [u_i(t) + \varphi_{ij}(t)], \\ \tilde{y}_i(t) &= L \tilde{x}_i(t), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\varphi_{ij}(t) = c^T \tilde{x}_{ij}(t) + \vartheta^T \tilde{x}_{ij}(t - h(t)) + \tau_i u_i(t) - (\tau_j + 1) \times u_j(t) + k_i f_i(t) - k_j f_j(t)$.

Введем вспомогательный контур [9], динамические процессы в котором описываются уравнением

$$\begin{aligned} \dot{x}_{ai}(t) &= A_N x_{ai}(t) + \alpha B_N u_i(t), \\ y_{ai}(t) &= L x_{ai}(t), \quad x_{ai}(0) = x_{ai0}, \end{aligned} \quad (4)$$

$\beta > 0$. Вычитая из (3) уравнение (4), составим функцию рассогласования $\zeta_i(t) = \tilde{y}_i(t) - y_{ai}(t)$:

$$\dot{\sigma}_i(t) = A_N \sigma_i(t) + B_N \phi_i(t), \quad \zeta_i(t) = L \sigma_i(t). \quad (5)$$

Здесь $\sigma_i(t) \in R^n$ — вектор состояния (5), $\phi_i(t) = \sum_{j \in N_j} [u_i(t) + \varphi_{ij}(t)] - \alpha u_i(t)$.

Преобразуем (5) к форме вход-выход:

$$Q_N(p) \zeta_i(t) = R_N(p) \phi_i(t), \quad (6)$$

где $Q_N(p), R_N(p)$ — линейные стационарные дифференциальные операторы, полученные при переходе от (5) к (6) и $\deg Q_N(p) = n$, $\deg R_N(p) = m$, $p = d/dt$ — оператор дифференцирования. Таким образом, функция $\zeta_i(t)$ содержит информацию о возмущениях, действующих на i -й узел (1). Поскольку производные сигналов $y_i(t)$ и $u_i(t)$ не доступны измерению (предположение 7), то, приняв $Q_N(p)/R_N(p) = Q_m(p)$, сигнал управления $u_i(t)$ сформируем в виде

$$u_i(t) = -\alpha^{-1} Q_m(p) \bar{\zeta}_i(t) = -\alpha^{-1} \bar{\phi}_i(t). \quad (7)$$

Здесь $\bar{\phi}_i(t)$ и $\bar{\zeta}_i(t)$ — оценки функций $\phi_i(t)$ и $\zeta_i(t)$ соответственно. Добавляя и вычитая идеальное управление $u_i(t) = -\alpha_i^{-1} Q_m(p) \zeta_i(t)$ в (3), а также принимая во внимание (7), перепишем (3) в виде

$$\dot{\tilde{x}}_i(t) = A_N \tilde{x}_i(t) + \alpha_i^{-1} B_N \bar{\Delta}_i(t), \quad y_i(t) = L \tilde{x}_i(t). \quad (8)$$

В последнем выражении $\bar{\Delta}_i(t) = \bar{\zeta}_i(t) - \zeta_i(t)$.

Для оценки производных сигнала $\bar{\zeta}_i(t)$ в (7) рассмотрим наблюдатель [13]

$$\dot{\xi}_i(t) = G_0 \xi_i(t) + D_0(\bar{\zeta}_i(t) - \zeta_i(t)), \quad \bar{\zeta}_i(t) = L \xi_i(t), \quad (9)$$

где $\xi_i(t) \in R^\gamma$, $\gamma = n - m$, $G_0 = \begin{bmatrix} 0 & I_{\gamma-1} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $I_{\gamma-1}$ — единичная матрица порядка $\gamma - 1$, $D_0 = -[d_1 \mu^{-1}, d_2 \mu^{-2}, \dots, d_\gamma \mu^{-\gamma}]^T$, коэффициенты $d_1, d_2, \dots, d_\gamma$ выбираются так, чтобы матрица $G = G_0 - DL$ была гурвицевой, $D = [d_1, d_2, \dots, d_\gamma]^T$, $\mu > 0$ — достаточно малая величина.

Введем вектор $\bar{\eta}_i(t) = \bar{D}(\xi_i(t) - \theta_i(t))$, где $\bar{D} = \text{diag}\{\mu^{\gamma-1}, \mu^{\gamma-2}, \dots, \mu, 1\}$, $\theta_i(t) = [\zeta_i(t), \dot{\zeta}_i(t), \dots, \zeta_i^{(\gamma)}(t)]^T$. Продифференцировав $\bar{\eta}_i(t)$ по времени с учетом уравнения (9), получим:

$$\dot{\bar{\eta}}_i(t) = \mu^{-1} G \bar{\eta}_i(t) + \bar{b} \zeta_i^{(\gamma)}(t), \quad \bar{\Delta}_i(t) = \mu^{\gamma-1} L \bar{\eta}_i(t),$$

где $\bar{b} = [0, \dots, 0, 1]^T$.

Преобразуем предпоследние уравнения в эквивалентные относительно выхода $\bar{\Delta}_i(t)$:

$$\dot{\eta}_i(t) = \mu^{-1} G \eta_i(t) + b \dot{\zeta}_i(t), \quad \bar{\Delta}_i(t) = \mu^{\gamma-1} L \eta_i(t). \quad (10)$$

Здесь $\eta_i(t) \in R^\gamma$, $\eta_i^1(t) = \bar{\eta}_i^1(t)$ — первые компоненты векторов $\eta_i(t)$ и $\bar{\eta}_i(t)$, $b = [1, 0, \dots, 0]^T$.

Принимая во внимание (7) и (10), преобразуем (8) к виду

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}_i(t) &= A_N \tilde{x}_i(t) + \alpha^{-1} \mu^{\gamma-1} \bar{b} g \Delta_i(t), \\ \tilde{y}_i(t) &= L \tilde{x}_i(t), \end{aligned} \quad (11)$$

где $\Delta_i(t) = [\eta_i^1(t), \dot{\eta}_i^1(t), \dots, (\eta_i^1(t))^{(\gamma)}]^T$, g — вектор, составленный из коэффициентов оператора $Q_N(p)$, записанных в обратном порядке.

Утверждение. Пусть выполнены предположения 1—7. Тогда для чисел $\alpha > 0$ и $\mu_0 > 0$ таких, что при $\mu \leq \mu_0$ и

$$\mu_0 < \|Q_2\|^{-1} \|H b b^T H\|,$$

$$\alpha > 8 \mu_0^{\gamma-1} (k-1) \lambda_2^{-1}(L(\Gamma)) \|Q_1\|^{-1} \|P \bar{b} g g^T \bar{b}^T P\|, \quad (12)$$

где $\lambda_2(L(\Gamma))$ — наименьшее ненулевое собственное число симметризованного лапласиана $L(\Gamma)$ орграфа Γ , P и H являются решением матричных уравнений

$$\begin{aligned} A_N^T P + P A_N &= -Q_1, \quad G^T H + H G = -Q_2, \\ Q_1 = Q_1^T > 0, \quad Q_2 = Q_2^T > 0, \end{aligned} \quad (13)$$

система управления (4), (7), (9), (11) обеспечивает выполнение ε -консенсуса (2).

Понятие и свойства лапласиана и симметризованного лапласиана подробно рассмотрены в [10, 11], где $\lambda_2(L(\Gamma))$ также называется алгебраической связностью (algebraic connectivity) графа.

Доказательство утверждения см. в Приложении.

Следствие. Утверждение справедливо, если Γ — граф, у которого есть остовное дерево.

Работоспособность предложенной системы управления продемонстрируем на численном примере.

Пример. Рассмотрим орграф Γ (рис. 1), описывающий информационные связи сети S , состоящей из четырех подсистем S_i , $i = 1, \dots, 4$.

Пусть S_i подсистема описывается следующим уравнением:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a_1 & a_2 \end{bmatrix} x_i(t) + \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ l_1 & l_2 \end{bmatrix} x_i(t-h(t)) + \\ &+ \begin{bmatrix} 0 \\ b_i \end{bmatrix} u_i(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ d_i \end{bmatrix} f_i(t), \quad y_i(t) = [1 \ 0] x_i(t). \end{aligned}$$

Класс неопределенности Ξ задан неравенствами: $|a_j| \leq 10$, $|l_j| \leq 10$, $j = 1, 2$, $0 < b_i \leq 10$, $|d_i| \leq 10$, $|f_i(t)| \leq 10$.

Цель управления состоит в проектировании системы управления, обеспечивающей выполнение условия ε -консенсуса (2).

Выберем в (4) матрицы $A_N = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix}$, $B_N = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$

и сформируем вспомогательный контур:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{ai}(t) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix} x_{ai}(t) + \alpha \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_i(t), \\ y_{ai}(t) &= [1 \ 0] x_{ai}(t), \quad x_{ai}(0) = 0. \end{aligned}$$

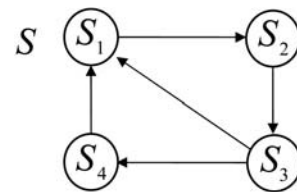


Рис. 1. Орграф Γ сети S

Пусть в (9) $D_i = [2 \ 1]^T$. Тогда уравнения наблюдателя производных сигнала $\zeta_i(t)$ имеют вид:

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_i^1(t) &= \xi_i^2(t) - 2\mu^{-1}(\xi_i^1(t) - \zeta_i(t)), \\ \dot{\xi}_i^2(t) &= -\mu^{-2}(\xi_i^1(t) - \zeta_i(t)), \quad \xi_i(0) = 0. \end{aligned}$$

В результате, закон управления (7) принимает вид $u(t) = -\alpha^{-1}(\dot{\xi}_{2i} + 2\xi_{2i} + \xi_{1i})$.

Для выбора параметров μ и α воспользуемся условиями (12). Пусть в (13) $Q_1 = Q_2 = 0,1I_2$. Исходя из структуры орграфа Γ (рис. 1), получаем, что число вершин $k = 4$ и симметризованный лапласиан равен

$$\begin{aligned} L(\Gamma) &= \\ &= \begin{bmatrix} 2 & 0 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 2 & 0 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 & -1 & -2 & -2 \\ -1 & 2 & -1 & 0 \\ -2 & -1 & 3 & 0 \\ -2 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Собственные значения $L(\Gamma)$: $\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 = 1,708$, $\lambda_3 = 3,397$ и $\lambda_4 = 6,895$.

Подставив все данные в условия (12) и (13), определим интервалы для μ_0 и α : $\mu_0 < 0,05$ и $\alpha > 0,0105$. Выберем $\mu_0 = 0,01$ и $\alpha = 1$. Подставив эти значения в уравнения вспомогательного контура, наблюдателя и закона управления, получим окончательно сформированную систему управления.

Обобщим распространенный пример [4–7], где каждый узел сети S задан двойным интегратором, на сеть, где $a_1 = a_2 = 0$ и $l_1 = 1$, $l_2 = 2$, $h(t) = 1 + e^{-t}$. Остальные параметры для каждой подсистемы сети S выберем следующими:

для S_1 : $b_1 = 1$, $d_1 = 1$, $f_1(t) = 1 + \sin t$, $x_1(0) = [1 \ 1]^T$;
 S_2 : $b_2 = 2$, $d_2 = 3$, $f_2(t) = 2 + \sin 2t$, $x_2(0) = [-1 \ 2]^T$;
 S_3 : $b_3 = 3$, $d_3 = 2$, $f_3(t) = 1 + 2\sin 1,2t$, $x_3(0) = [-2 \ 3]^T$;
 S_4 : $b_4 = 2$, $d_4 = 5$, $f_4(t) = 1 + 3\sin 0,8t$, $x_4(0) = [3 \ 4]^T$.
 На рис. 2–6 приведены переходные процессы по

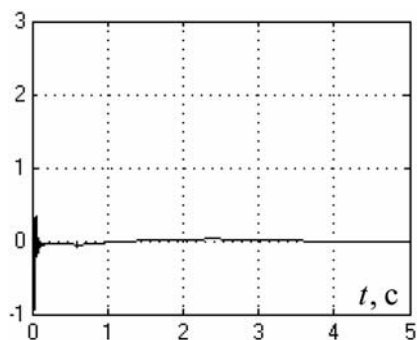


Рис. 2. Переходные процессы по $\tilde{y}_{13}(t)$

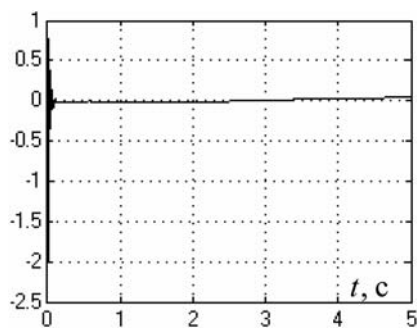


Рис. 3. Переходные процессы по $\tilde{y}_{14}(t)$

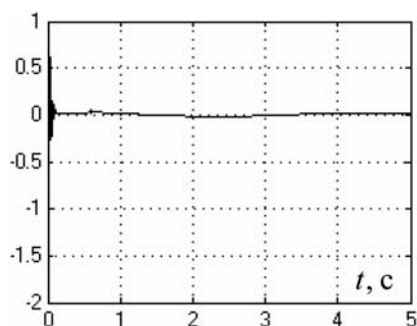


Рис. 4. Переходные процессы по $\tilde{y}_2(t)$

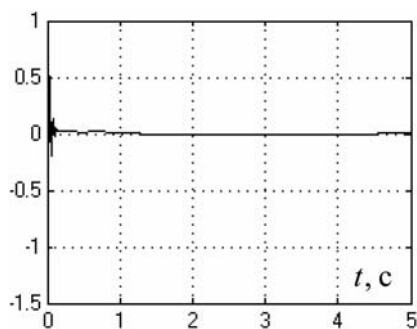


Рис. 5. Переходные процессы по $\tilde{y}_3(t)$

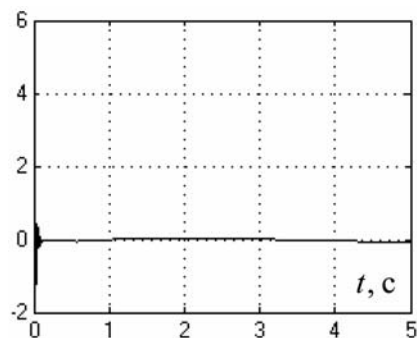


Рис. 6. Переходные процессы по $\tilde{y}_4(t)$

ошибкам $\tilde{y}_{13}(t) = y_1(t) - y_3(t)$, $\tilde{y}_{14}(t) = y_1(t) - y_4(t)$,
 $\tilde{y}_2(t) = y_2(t) - y_1(t)$, $\tilde{y}_3(t) = y_3(t) - y_2(t)$ и
 $\tilde{y}_4(t) = y_4(t) - y_3(t)$ соответственно.

Из результатов численного моделирования видно, что предложенная система управления обеспечивает условие ε -консенсуса с заданной точностью.

Уменьшая числа α во вспомогательном контуре (4), законе управления (7) и μ в наблюдателе (9), уменьшаем значение ε в целевом условии (2), что подтверждает результаты аналитических расчетов. Отметим, что закон регулирования и расчет параметров μ , α учитывает топологию сети, что упрощает реализацию алгоритма.

Заключение. В статье рассмотрено децентрализованное робастное управление динамической сетью, где каждая ее подсистема задана линейным априорно, параметрически и функционально неопределенным дифференциальным уравнением с запаздыванием по состоянию. Предполагается, что измерению доступны только скалярные выходы каждого агента. При решении рассматривался орграф, каждая вершина которого ассоциирована с соответствующей подсистемой сети. Предложен алгоритм, позволяющий обеспечить ε -консенсус в сети с заданной точностью и компенсировать неизвестные возмущения, действующие на агенты. Для выделения возмущений предлагалось использовать вспомогательный контур, предложенный в [9]. При синтезе закона управления учитывалась топология сети, что позволило существенно упростить реализацию алгоритма, особенно, когда сеть содержит достаточно большое число узлов.

Получены условия, позволяющие выбирать параметры α во вспомогательном контуре, законе управления и μ в наблюдателе производных с учетом топологии орграфа сети. Система также работоспособна, если в объекте управления отсутствует слагаемое с запаздыванием. Алгоритм обобщен на случай, если узлы сети идентифицированы с вершинами графа.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Для доказательства утверждения рассмотрим две вспомогательные леммы.

Лемма 1. Пусть задан орграф Γ , у которого есть остовное ориентированное дерево. Рассмотрим квадратичную форму

$$S(t) = \sum_{i=1}^k \sum_{j \in N_j} (x_i(t) - x_j(t))^T (x_i(t) - x_j(t)), \quad (14)$$

где $x_i(t) \in R^n$. Тогда для $k > 1$ квадратичную форму (14) можно оценить снизу и сверху как

$$S(t) \geq 0,25(k-1)^{-1} \lambda_2(L(\Gamma)) \times \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k (x_i(t) - x_j(t))^T (x_i(t) - x_j(t)),$$

$$S(t) \leq \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k (x_i(t) - x_j(t))^T (x_i(t) - x_j(t)). \quad (15)$$

Здесь $L(\Gamma)$ — симметризованный лапласиан графа Γ [10].

Доказательство леммы 1. Докажем сначала оценку снизу. Для этого осуществим преобразования

$$S(t) = \sum_{i=1}^k \sum_{j \in N_j} (x_i(t) - x_j(t))^T (x_i(t) - x_j(t)) = 0,5x^T(t)Lx(t). \quad (16)$$

Симметризованный лапласиан $L(\Gamma)$ — неотрицательная матрица. Так как орграф $L(\Gamma)$ содержит ориентированное остовное дерево, что эквивалентно его связности, то $0 = \lambda_1(L(\Gamma)) < \lambda_2(L(\Gamma)) \leq \dots \leq \lambda_k(L(\Gamma))$, т. е. наименьшее собственное число $\lambda_1(L(\Gamma)) = 0$ имеет единичную кратность и соответствует собственному вектору $\text{col}(1, \dots, 1)$ [10, 11]. Тогда выражение (16) оценим снизу как

$$0,5x^T(t)L(\Gamma)x(t) \geq 0,5\lambda_2(L(\Gamma))x^T(t)x(t). \quad (17)$$

Для $k > 1$, воспользовавшись неравенством

$$x^T(t)x(t) \geq 0,5(k-1)^{-1} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k (x_i(t) - x_j(t))^T (x_i(t) - x_j(t))$$

и подставив его в (17), получим оценку снизу (15) для квадратичной формы (14).

Оценка сверху очевидна, так как это равносильно введению дополнительных ребер, соединяющих все пары вершин, т. е. орграф Γ дополнен до полного орграфа.

Лемма 2. Пусть орграф Γ содержит ориентированное остовное дерево. Рассмотрим квадратичную форму

$$S(t) = \sum_{i=1}^k \sum_{j \in N_j} (x_i(t) - x_j(t))^T K(x_i(t) - x_j(t)), \quad (18)$$

где $K = K^T > 0$. Тогда для $k > 1$ справедливы следующие оценки снизу и сверху:

$$S(t) \geq 0,25(k-1)^{-1} \lambda_2(L(\Gamma)) \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k (x_i(t) - x_j(t))^T K(x_i(t) - x_j(t)),$$

$$S(t) \leq \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k (x_i(t) - x_j(t))^T K(x_i(t) - x_j(t)). \quad (19)$$

Доказательство леммы 2. Докажем оценку снизу.

Введя преобразование $x_i(t) = K^{-\frac{1}{2}} w_i(t)$ и подставив его в (18), получим

$$\begin{aligned} S(t) &= \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k (w_i(t) - w_j(t))^T K^{-\frac{1}{2}} K K^{-\frac{1}{2}} (w_i(t) - w_j(t)) = \\ &= \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k (w_i(t) - w_j(t))^T (w_i(t) - w_j(t)). \end{aligned}$$

Тогда, с учетом (14) и (15) получим

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^k \sum_{j \in N_j} (w_i(t) - w_j(t))^T (w_i(t) - w_j(t)) &\geq 0,25(k-1)^{-1} \times \\ &\times \lambda_2(L(\Gamma)) \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k (w_i(t) - w_j(t))^T (w_i(t) - w_j(t)). \end{aligned}$$

Осуществив в последнем выражении обратную

замену $w_i(t) = K^{\frac{1}{2}} x_i(t)$, получим

$$\begin{aligned} 0,25(k-1)^{-1} \lambda_2(L(\Gamma)) \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k (x_i(t) - x_j(t))^T \times \\ \times K^{\frac{1}{2}} K^{\frac{1}{2}} (x_i(t) - x_j(t)) &\geq 0,25(k-1)^{-1} \lambda_2(L(\Gamma)) \times \\ \times \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k (x_i(t) - x_j(t))^T K (x_i(t) - x_j(t)). \end{aligned}$$

Как и в лемме 1, оценка сверху следует из того, что орграф дополнен до полного орграфа.

Доказательство утверждения. Рассмотрим систему, составленную из уравнений (10), (11) и записанную в виде

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}_i(t) &= A_N \tilde{x}_i(t) + \alpha^{-1} \mu_0^{\gamma-1} \bar{b} g \Delta_i(t), \\ \mu_1 \dot{\eta}_i(t) &= G \eta_i(t) + \mu_2 b \dot{\zeta}(t). \end{aligned} \quad (20)$$

Для исследования поведения ее решений воспользуемся первой леммой [14]. Согласно [14], положим в (20) $\mu_2 = 0$. Очевидно, что в этом случае система (20) асимптотически устойчива в силу матриц A_N и G . Следовательно, векторы $\tilde{x}_i(t)$, $\eta_i(t)$ ограничены вместе со своими первыми производными. Тогда в (20) ограничены сигналы $\Delta_i(t)$, $\dot{\zeta}(t)$. Из ограниченности $\Delta_i(t)$ следует, что в (9) $|\xi_i(t)| < \infty$, а значит, из (7) $|u_i(t)| < \infty$. Однако необходимо определить μ_0 , при котором исходная система будет диссипативной.

Пусть $\mu_1 = \mu_2 = \mu_0$. Выберем функцию Ляпунова

$$V(t) = \sum_{i=1}^k \tilde{x}_i^T(t) P \tilde{x}_i(t) + \sum_{i=1}^k \eta_i^T(t) H \eta_i(t). \quad (21)$$

Принимая во внимание (13), возьмем от (21) производную по времени вдоль траекторий (20):

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \sum_{i=1}^k [-\tilde{x}_i^T(t) Q_1 \tilde{x}_i(t) + \\ &+ 2\alpha^{-1} \mu_0^{\gamma-1} \tilde{x}_i^T(t) P \bar{b} g \Delta_i(t)] + \\ &+ \sum_{i=1}^k [-\mu_0^{-1} \eta_i^T(t) Q_2 \eta_i(t) + \eta_i^T(t) H b \dot{\zeta}(t)]. \end{aligned} \quad (22)$$

Для оценки первого и второго слагаемых в (22) воспользуемся (19):

$$\begin{aligned} - \sum_{i=1}^k \tilde{x}_i^T(t) Q \tilde{x}_i(t) &= - \sum_{i=1}^k \sum_{j \in N_j} \tilde{x}_{ij}^T(t) Q \tilde{x}_{ij}(t) \leq \\ &\leq -0,25(k-1)^{-1} \lambda_2(L(\Gamma)) \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \tilde{x}_{ij}^T(t) Q \tilde{x}_{ij}(t), \\ 2\alpha^{-1} \mu_0^{\gamma-1} \sum_{i=1}^k \tilde{x}_i^T(t) P \bar{b} g \Delta_i(t) &\leq \\ &\leq 2\alpha^{-1} \mu_0^{\gamma-1} \sum_{i=1}^k [\tilde{x}_i^T(t) P \bar{b} g g^T \bar{b}^T P \tilde{x}_i(t) + |\Delta_i(t)|^2] \leq \\ &\leq 2\alpha^{-1} \mu_0^{\gamma-1} \sum_{i=1}^k \sum_{j \in N_j} \tilde{x}_{ij}^T(t) P \bar{b} g g^T \bar{b}^T P \tilde{x}_{ij}(t) + \\ &+ 2\alpha^{-1} \mu_0^{\gamma-1} \sum_{i=1}^k |\Delta_i(t)|^2 \leq 2\alpha^{-1} \mu_0^{\gamma-1} \times \\ &\times \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \tilde{x}_{ij}^T(t) P \bar{b} g g^T \bar{b}^T P \tilde{x}_{ij}(t) + 2\alpha^{-1} \mu_0^{\gamma-1} \sum_{i=1}^k |\Delta_i(t)|^2. \end{aligned}$$

Четвертое слагаемое в (22) оценим в виде:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^k \eta_i^T(t) H b \dot{\zeta}(t) &\leq \\ &\leq \sum_{i=1}^k [\mu_0^{-1} \eta_i^T(t) H b b^T H \eta_i(t) + \mu_0 |\dot{\zeta}_i(t)|^2]. \end{aligned}$$

Примем $\psi = \sup\{2\alpha^{-1} \mu_0^{\gamma-2} |\Delta_i(t)|^2 + |\dot{\zeta}_i(t)|^2\}$. Тогда выражение (22) можно переписать как

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &\leq - \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \tilde{x}_{ij}^T(t) (0,25(k-1)^{-1} \lambda_2(L(\Gamma)) Q_1 - \\ &- 2\alpha^{-1} \mu_0^{\gamma-1} P \bar{b} g g^T \bar{b}^T P) \tilde{x}_{ij}(t) - \\ &- \mu_0^{-1} \sum_{i=1}^k \eta_i^T(t) (Q_2 - \mu_0 H b b^T H) \eta_i(t) + k \mu_0 \psi. \end{aligned}$$

Очевидно, если выполнены условия (12), то $\dot{V}(t) \leq -\beta V(t) + k \mu_0 \psi$, $\beta > 0$. Пусть $0,25(k-1)^{-1} \times \lambda_2(L(\Gamma)) Q_1 - 2\alpha^{-1} \mu_0^{\gamma-1} P \bar{b} g g^T \bar{b}^T P = R_1 > 0$ и

$Q_2 - \mu_0 H b b^T H = R_2 > 0$. Перепишем последнее неравенство как

$$\dot{V}(t) \leq - \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \tilde{x}_{ij}^T(t) R_1 \tilde{x}_{ij}(t) - \mu_0^{-1} \sum_{i=1}^k \eta_i^T(t) R_2 \eta_i(t) + k\mu_0\psi. \quad (23)$$

В силу (19) оценим функцию (22) в виде

$$\begin{aligned} V(t) &= \sum_{i=1}^k \sum_{j \in N_j} \tilde{x}_{ij}^T(t) P \tilde{x}_{ij}(t) + \sum_{i=1}^k \eta_i^T(t) H \eta_i(t) \leq \\ &\leq \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \tilde{x}_{ij}^T(t) P \tilde{x}_{ij}(t) + \sum_{i=1}^k \eta_i^T(t) H \eta_i(t). \end{aligned} \quad (24)$$

Выберем число β из условия $\beta = \min\{\lambda_{\max}^{-1}(P) \times \lambda_{\min}(R_1), \mu_0^{-1} \lambda_{\max}^{-1}(H) \lambda_{\min}(R_2)\}$. Тогда с учетом (23) перепишем (24) как $\dot{V}(t) \leq -\beta V(t) + k\mu_0\psi$.

Решив последнее неравенство, получим

$$V(t) \leq V(0)e^{-\beta t} + (1 - e^{-\beta t})k\mu_0\psi.$$

Откуда для фиксированного значения времени $t = T$ следует оценка величины ε в целевом условии (2):

$$\begin{aligned} \varepsilon &\leq \sqrt{\lambda_{\min}^{-1}(P) V(T)} \leq \\ &\leq \sqrt{\lambda_{\min}^{-1}(P) [V(0)e^{-\beta T} + (1 - e^{-\beta T})k\mu_0\psi]}. \end{aligned} \quad (25)$$

Оценки (12) и (25) достаточно грубые. Но из них видно, что уменьшением числа μ_0 можно получить требуемую точность ε в (2) и система управления работоспособна.

Доказательство следствия. Действительно, граф, у которого есть остовное дерево, можно ассоциировать с симметричным орграфом, у которого есть направленное остовное дерево.

1. Теряев Е. Д., Петрин К. В., Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Агентные технологии в автоматизированных информационно-управляющих системах. Часть 1. Основы агентного подхода // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 7. С. 11–20.
2. Fax A., Murray R. M. Information flow and cooperative control of vehicle formations // IEEE Trans. on Automatic Control. 2004. V. 49. N. 9. P. 1465–1476.
3. Yoshioka C., Namerikawa T. Observed-based consensus control strategy for multi-agent system with communication time delay // 17th IEEE International Conference on Control Applications. San Antonio, Texas, USA. 2008. P. 1037–1042.
4. Liu Y., Jia Y., Du J., Shiyong Y. Dynamic output feedback control for consensus of multi-agent systems: an H^∞ approach // American Control Conference, St. Louis, MO, USA. 2009. P. 4470–4475.
5. Stankovic M. S., Stipanovic D. M., Stankovic S. S. Decentralized consensus based control methodology for vichel formations in air and deep space // American Control Conference, Baltimore, MD, USA. 2010. P. 3660–3665.
6. Xie G., Liu H., Wang L., Jia Y. Consensus in networked multi-agent systems via sampled control: switching topology case // American Control Conference, St. Louis, MO, USA. 2009. P. 4525–4530.
7. Джунусов И. А., Фрадков А. Л. Синхронизация по выходам в сетях линейных объектов // Сб. докл. XI Междунар. конф. "Устойчивость и колебания нелинейных систем управления". ИПУ им. В. А. Трапезникова, г. Москва. 2010. С. 1–2.
8. Фрадков А. Л. Квадратичные функции Ляпунова в задаче адаптивной стабилизации линейного динамического объекта // Сиб. мат. журн. 1976. № 2. С. 436–446.
9. Цыкунов А. М. Алгоритмы робастного управления с компенсацией ограниченных возмущений // Автоматика и телемеханика. 2007. № 7. С. 103–115.
10. Godsil C., Royle G. Algebraic graph theory. New York: Springer-Verlag, 2001.
11. Агаев Р. П., Чеботарев П. Ю. Матрица максимальных входящих лесов орграфа и ее применения // Автоматика и телемеханика. 2000. № 9. С. 15–43.
12. Фрадков А. Л. Кибернетическая физика: принципы и примеры. СПб.: Наука, 2003.
13. Atassi A. N., Khalil H. K. A separation principle for the stabilization of class of nonlinear systems // IEEE Trans. on Automatic Control. 1999. V. 44. N. 9. P. 1672–1687.
14. Брусин В. А. Об одном классе сингулярно возмущенных адаптивных систем. 1 // Автоматика и телемеханика. 1995. № 4. С. 119–127.

ИНФОРМАЦИЯ

С 3 по 8 октября 2011 г. в пос. Дивноморское Геленджикского района в рамках
4-й Всероссийской мультikonференции по проблемам управления (МКПУ-2011)
 состоится научно-техническая конференция
"МЕХАТРОНИКА И ЭРГАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ" (МЭС-2011)

Научные направления конференции:

- ♦ **АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ В МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМАХ**
Руководители: член-корр. РАН Е. Д. Теряев, д. т. н., проф. Н. Б. Филимонов
- ♦ **АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИНФОРМАТИЗАЦИЯ ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**
Руководители: член-корр. РАН Г. Г. Себряков, д. пс. н., проф. С. Ф. Сергеев
- ♦ **ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**
Руководители: д. т. н., проф. Ю. В. Подураев, д. т. н., проф. А. С. Ющенко
- ♦ **ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ МЕХАТРОННЫЕ И ЭРГАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**
Руководители: член-корр. РАН А. Ф. Резчиков, д. т. н., проф. В. Ф. Коростелев

Подробная информация о мультikonференции МКПУ-2011 и условиях участия в ней размещается на сайте:
<http://www.mvs.tsure.ru>

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

УДК 621.91.05-52+681.51

С. Н. Григорьев, д-р техн наук, проф.,
ректор МГТУ "Станкин"
rector@stankin.ru

Научно-технические проблемы построения современных технологических систем с числовым программным управлением

Обсуждается современное состояние и перспективы развития отечественных систем числового программного управления (ЧПУ) технологическим оборудованием. Акцентируется внимание на развитии универсальной многофункциональной импортозамещающей системы ЧПУ класса "Hi-End".

Ключевые слова: технологическое оборудование, системы ЧПУ, системы ЧПУ класса "Hi-End"

Введение

Центральное место в современном технологическом, в частности, механообрабатывающем оборудовании занимают системы ЧПУ, во многом определяющие его основные технические характеристики. Системы ЧПУ, в функции которых входит, кроме прочего, сделать процесс общения человека-оператора с технологическим оборудованием максимально удобным и эффективным, становятся необходимым условием для обеспечения конкурентоспособности любого механообрабатывающего оборудования. Потребители при покупке оборудования изначально исходят не только из наличия системы управления как таковой, но и из того, что она отвечает современным представлениям об интерфейсе пользователя: оснащена устройством отображения цветной графической информации достаточного размера, средствами максимально понятной пользователю визуализации процесса, эргономичными органами управления.

В последние тридцать лет доля станков и кузнечно-прессового оборудования с ЧПУ в мировом выпуске неуклонно увеличивалась. Оснащенность выпускаемых станков системами ЧПУ можно считать мерой качественного уровня развития национального станкостроения. Например, в производстве одного из лидеров мирового станкостроения и ведущего экспортера в Россию — Германии — доля металлорежущих станков с ЧПУ сегодня составляет

около 90 %, доля кузнечно-прессового оборудования с ЧПУ — более 50 %.

К сожалению, вопреки мировой тенденции развития в России в области систем ЧПУ в последние 20 лет не только не было прогресса, но и наблюдался регресс. Сегодня системами ЧПУ оснащаются только около 5 % выпускаемых в России металлорежущих станков и не более 1 % кузнечно-прессового оборудования. Для сравнения, в СССР в 1990 г. эти показатели составляли 14 % (в три раза больше, чем в современной России) и 6 % (в шесть раз больше, чем в современной России), что тогда примерно соответствовало мировому уровню.

Качественная картина не лучше. Зарубежные системы ЧПУ постоянно совершенствовались и совершенствуются, обеспечивая возрастающие скорости и точности рабочих движений и предоставляя пользователям принципиально новые возможности по автоматизации производства, в числе которых методы удаленного управления оборудованием через сеть Интернет. Основными направлениями развития систем программного управления в мире являются:

- увеличение производительности вычислений, которая отражается на качестве управления и напрямую влияет на производительность и качество обработки — за счет применения все более производительной вычислительной техники и совершенствования алгоритмов управления;
- совершенствование интерфейса пользователя: предоставление все более развитых средств моделирования и визуализации технологического процесса изготовления деталей, контроля за этим процессом;
- совершенствование средств формального описания технологического процесса (составления управляющих программ) при переналадке оборудования, максимальное освобождение человека-оператора от рутинных управляющих операций, обеспечение интеллектуального автоматического контроля за технологическим процессом и состоянием оборудования;
- обеспечение возможностей построения из систем управления иерархических сетей, совершенствование средств и способов подготовки, сортировки и обработки информации, обмениваемой по таким сетям, для предоставления управляющему персоналу максимально оперативной и объективной информации о состоянии производства.

Достигнутый мировыми лидерами качественный уровень развития систем ЧПУ значительно опережает уровень современных российских разработок. В этих условиях российские производители механообрабатывающего оборудования вынужденно переориентировались на оснащение своей продукции импортными системами ЧПУ. При этом возникает две большие проблемы.

Во-первых, вопреки распространенному представлению, несмотря на вхождение России в глобальный рынок, не любое оборудование с ЧПУ и не любая система ЧПУ может быть свободно импортирована в Россию. Все промышленно развитые страны, стремясь сохранить достигнутое преимущество в технологическом развитии, ограничивают распространение наиболее наукоемкого оборудования, используя механизмы Вассенаарского соглашения о контроле над распространением технологий и оборудования двойного назначения. Членами Вассенаарского соглашения являются все промышленно развитые страны мира, в том числе и Россия. Экспорт двойных технологий из этих стран подлежит государственному лицензированию: национальные органы экспортного контроля могут отказать любому поставщику в лицензии на продажу любого товара, отнесенного к двойным технологиям, на основании соображений национальной безопасности. В список Вассенаарского соглашения включены системы ЧПУ с функциями 5-координатной обработки и системы управления технологическими роботами, т. е. самые сложные и технически совершенные системы управления, без которых невозможно производство современных самолетов, ракет, судов, двигателей, энергоустановок и прочей аналогичной техники не только оборонного, но и гражданского назначения. Поставки в Россию таких систем серьезно затруднены, некоторые модели систем не поставляются вообще.

Вторая проблема заключается в том, что современная система ЧПУ является закрытой компьютерной системой с широким набором функций и возможностей (как вычислительных, так и коммуникационных), полностью известных только разработчику системы. Зарубежные производители систем ЧПУ, требуя обязательного подключения систем к сети Интернет для сервисного обслуживания, оснащая системы датчиками глобальной навигационной системы GPS, включая в состав систем скрытые от пользователя средства накопления и передачи информации, имеют возможность постоянно или периодически получать сведения о том, где находится оснащенное системой ЧПУ оборудование и какая продукция на нем производится. Очевидно, что такое положение совершенно недопустимо для российских машиностроительных производств, выпускающих продукцию стратегического назначения (вооружения, ракетно-космическую технику, ядерное оборудование).

Обе названные проблемы в области систем ЧПУ являются проблемами обеспечения технологической независимости России. Россия может в долгосрочной перспективе претендовать на самостоятельную роль в мировом сообществе только в том случае, если обеспечит у себя развитие собственного конкурентоспособного станкостроения, снабжающего российские стратегические машиностроительные предприятия оборонно-промышленного, авиакосмического, судостроительного и энергомашиностроительного комплексов конкурентоспособным отечественным механообрабатывающим оборудованием. Решение этой задачи невозможно без разработки и освоения серийного производства российских систем ЧПУ, не уступающих по своим техническим характеристикам и конкурентоспособности лучшим мировым аналогам.

Характеристики современных зарубежных систем ЧПУ класса "Hi-End"

Успешность создания системы ЧПУ класса "Hi-End" определяется, во-первых, правильностью выбранной архитектурной концепции, во-вторых, удачным выбором технологии разработки. Задача такого масштаба выходит за рамки одной организации (компании) и может быть решена только в рамках совместных проектов с привлечением ученых из передовых университетов и высококлассных технических специалистов из промышленности.

Вектор развития систем ЧПУ в мире задается японской фирмой FANUC. Последний тренд — все более широкое применение функций искусственного интеллекта, которые позиционируются как "умные решения". Для изготовления деталей с высокой степенью чистоты поверхности, при которой финишная обработка практически не требуется, программа контурной обработки может быть дополнена функцией наноинтерполяции. "Умная" система компенсации температурной деформации осуществляет поправку на температурную деформацию шпинделя по оси Z, уровень точности поправки зависит от конкретных рабочих условий. На базе элементов искусственного интеллекта построена система автоматического контроля (диагностики) состояния (износа) инструментов — система регулирования жизненного цикла инструментов. Она следит за длительностью и частотой эксплуатации инструментов и автоматически заменяет их в случае превышения эксплуатационных параметров. Система компенсации ударных и вибрационных возмущений осуществляет автоматическое управление подачей при обходе углов. Системы ЧПУ "FANUC" серии 30i/31i/32i-MODEL A осуществляют одновременное управление десятью каналами, 32 осями (координатами) и восемью шпинделями. Максимальное число одновременно интерполируемых осей (координат) — 24.

Флагманская система немецкой фирмы SIEMENS модели SINUMERIK 840D/Di sl (Solution Line) имеет расширенную модульную архитектуру, функции сплайн-интерполяции и сжатия (компрессии) кадров, располагает системами поддержки цехового программирования. В системах ЧПУ 840D/Di sl число управляемых осей (координат) достигает 64.

Системы ЧПУ немецкой фирмы HEIDENHAIN ориентированы на поддержку технологического процесса, чему служит мощный набор станочных циклов и инструментарий для их разработки. Функция предпросмотра программы (Look-ahead) с буфером до 1024 кадров своевременно распознает изменения в направлении движения инструмента для последующей коррекции законов разгона и торможения. Функция адаптивного управления подачей регулирует контурную скорость перемещения по траектории в зависимости от используемого процента мощности шпинделя. Модель ЧПУ класса "Hi-End" iTNC-530 фирмы "HEIDENHAIN" ориентирована на обработку поверхностей свободной формы и позволяет одновременно управлять 13 осями (координатами) при минимальном времени обработки кадра управляющей программы до 0,5 мс. Система оснащена инструментарием удаленной диагностики, контроля и управления системой ЧПУ, а также функцией мониторинга столкновений механических модулей станка, приспособлений, деталей и инструментов при отработке управляющей программы на станке — DCM (Dynamic Collision Monitoring).

Наиболее совершенная модель системы ЧПУ немецкой фирмы BOSCH REXROTH — система MTX Advanced — может управлять 64 осями (координатами) по 12 каналам управления, до восьми интерполируемых осей (координат) на канал. Система имеет функции вычислений и интерполяции с нанометрической точностью, а также трехмерной визуализации процесса обработки по управляющей программе. Система автоматически предотвращает столкновения механических модулей станка, приспособлений, деталей и инструментов.

Система ЧПУ класса "Hi-End" модели CNC 8070 испанской фирмы FAGOR реализует интерполяцию с нанометрической точностью и применима для высокоскоростной обработки на многокоординатных обрабатывающих центрах. Специальные алгоритмы для высокоскоростной обработки оптимизируют обработку для получения максимальной скорости, обеспечивают гладкий контур и наилучшую чистоту обработки. Система обеспечивает одновременное управление 28 интерполируемыми осями (координатами), четырьмя шпинделями, четырьмя инструментальными магазинами по четырем каналам управления. Несколько систем ЧПУ модели 8070 могут объединяться в сложные комплексы на базе Ethernet. Система поддерживает язык программирования высокого уровня, сплайн-интерполяцию,

трехмерное графическое моделирование процесса обработки. Система имеет функции удаленной диагностики для профилактического обслуживания оборудования.

Двухкомпьютерная модель M750 японской фирмы MITSUBISHI реализует до четырех каналов управления и управляет 16 осями (координатами), восемь из которых могут одновременно интерполироваться. Функция управления качеством обеспечивает постоянство качества обработки независимо от геометрии формы. Система осуществляет коррекцию ошибок, связанных с деформацией координаты, синхронизацию движения сервопривода и шпинделя за счет учета сетевой задержки команд, минимизацию влияния вибраций. Функция предотвращения столкновений в процессе обработки учитывает модель станка, относительное положение детали и траекторию движения инструмента.

На разработку каждого поколения систем ЧПУ класса "Hi-End" мировые лидеры затрачивают 10...15 лет. Трудоемкость разработки составляет тысячи человеко-лет, что определяет достаточно высокую цену на системы ЧПУ этого уровня: ценовой диапазон импортных систем ЧПУ класса "Hi-End" начинается от 15 тыс. евро и доходит до 40...70 тыс. евро, в зависимости от конкретной конфигурации системы. При этом в эту сумму не входит стоимость приводов, т. е. цена комплектной системы может быть существенно выше.

Зарубежную систему ЧПУ, синхронно управляющую четырьмя осями, можно приобрести без особых проблем, хотя за последние 2...3 года время поставки систем ЧПУ и их компонентов в Россию увеличились более чем вдвое. Для приобретения системы ЧПУ, синхронно управляющей пятью и более осями (координатами), требуется разрешение органов экспортного контроля страны происхождения системы, на получение которого, например в Германии, требуется от 8 до 12 месяцев, причем без гарантии результата. Приобретение аналогичной системы ЧПУ у японских производителей еще сложнее (практически невозможно). Ряд производителей, например фирма HEIDENHAIN, продает в Россию только экспортные варианты систем ЧПУ с ограниченными функциями.

Даже если российскому потребителю удалось купить импортную систему ЧПУ класса "Hi-End", ее применение для оснащения конкретного российского станка сильно затруднено тем, что, несмотря на декларируемую некоторыми производителями "открытость" своих систем ЧПУ, это — не более чем рекламный трюк. Например, фирма SIEMENS продает уровни открытости своей флагманской системы 840-й серии в зависимости от потребностей заказчика, но и самый высокий уровень открытости, который можно приобрести, не раскрывает системного ядра и не позволяет покупателю самостоятельно, без участия специалистов фирмы

SIEMENS реализовать на станке современные технологии многокоординатной высокоскоростной прецизионной обработки.

Кроме того, многие зарубежные фирмы-производители систем ЧПУ практикуют политику комплектной поставки и вынуждают потребителя приобретать весь комплект оборудования только у одного производителя. FANUC — мировой лидер в области ЧПУ — продает свои системы только в комплекте с собственными приводами и электроавтоматикой. Ситуация с фирмой SIEMENS похожа: хотя у фирмы можно купить все компоненты системы ЧПУ по отдельности и состыковать с оборудованием сторонних производителей, при этом неизбежны потери в быстродействии и функциях [2]. Например, применяемый в системах ЧПУ фирмы SIEMENS высокоскоростной протокол DriveClick с пропускной способностью 100 Мбит/с является закрытым и может быть использован только для управления следящими приводами фирмы SIEMENS. Этими же приводами фирмы SIEMENS можно управлять и от системы ЧПУ стороннего производителя (либо от системы ЧПУ фирмы SIEMENS можно управлять приводами стороннего производителя) — но только по протоколу Profibus DP, который обеспечивает максимальную скорость лишь 12,5 Мбит/с, т. е. практически на порядок меньше, чем DriveClick. Соответственно, неизбежны (при прочих равных условиях) потери на порядок в точности или скорости обработки.

В совокупности организационные, экономические и технические барьеры, выстроенные зарубежными производителями систем ЧПУ (самостоятельно или по воле политического руководства соответствующих стран), практически полностью блокируют применение в России импортных систем ЧПУ класса "Hi-End" для комплектации отечественного механообрабатывающего оборудования. Однако это обстоятельство, как правило, остается скрытым для тех, кто судит о доступности зарубежных систем ЧПУ только на основании рекламных заявлений фирм-производителей.

Импортозамещение в области систем ЧПУ

В России не производятся системы ЧПУ класса "Hi-End", а выпускаемые системы в силу архитектурных ограничений не могут служить базой для создания системы класса "Hi-End".

Современные системы ЧПУ отечественного производства фирм "Балт-Систем", "Модмаш-Софт", "Станкоцентр", НТЦ "ИНЭЛСИ", "Микрос" и других организаций можно условно разделить на две большие категории:

- системы, базирующиеся, кроме серийного персонального компьютера, на программно-аппаратных средствах собственной разработки, с при-

менением устаревших DOS-подобных операционных систем реального времени;

- системы, базирующиеся, кроме серийного персонального компьютера, на современных импортных микропроцессорных программно-аппаратных комплексах реального времени, с применением операционных систем семейства Windows и специальных программных дополнений реального времени.

Первая группа систем не имеет перспектив развития, поскольку ориентирована на устаревшие и более не поддерживаемые и не развиваемые зарубежные компьютерные технологии.

Вторая группа систем основывается на заимствованных технических решениях. Импортные микропроцессорные программно-аппаратные комплексы реального времени ("контроллеры движения" — Motion Controller, в большинстве российских случаев — контроллеры серии PMAC американской фирмы Delta Tau) занимают в этих системах центральное место, полностью определяя архитектуру и технические свойства комплектной системы ЧПУ и, во многом, всего станка. Продвижение таких практически полностью импортных систем ЧПУ на российский рынок под маркой "российских систем" открывает рынок зарубежным производителям базовых комплексов для систем ЧПУ и препятствует попыткам отдельных российских разработчиков создать конкурентоспособные отечественные системы ЧПУ, построенные на оригинальных отечественных программно-аппаратных комплексах.

Отечественные системы ЧПУ не поддерживают функции многокоординатной высокоскоростной прецизионной обработки. Основная область применения российских систем ЧПУ — управление простыми токарными и фрезерными станками. В соответствии с этим основная номенклатура выпускаемых в России систем ЧПУ — недорогие одноканальные системы с интерполяцией двух-трех осей (координат). Трудоемкость разработки такой системы ЧПУ, особенно при использовании импортного программно-аппаратного ядра, — единицы или, максимум, десятки человеко-лет, т. е. на 2...3 порядка меньше, чем трудоемкость разработки системы ЧПУ класса "Hi-End".

Необходимость обеспечения долгосрочной технологической независимости российского машино- и станкостроения, практическая недоступность в России наиболее сложных и совершенных зарубежных систем ЧПУ, ограниченные возможности российских систем ЧПУ и возрастающая потребность российского машиностроения в механообрабатывающем оборудовании для многокоординатной высокоскоростной прецизионной обработки ставит задачу разработки отечественной системы ЧПУ класса "Hi-End", имеющей функции 5-координатной обработки и искусственного интеллекта.

На пути решения этой задачи возникают два основных препятствия.

Первое — организационно-финансовое. В условиях недостатка средств у потенциальных потребителей отечественной системы ЧПУ класса "Hi-End" (российских станкостроительных предприятий) и их практической ориентации на преимущественное использование импортных систем ЧПУ представляется невозможным привлечь необходимые для разработки отечественной системы ЧПУ класса "Hi-End" финансовые средства без участия государства. Учитывая сложность задачи, необходимость концентрации усилий разноплановых научных (вузы, институты Российской академии наук, отраслевые научно-исследовательские институты) и промышленных (предприятия машино- и станкостроения) организаций, форматом проекта по созданию отечественной системы ЧПУ класса "Hi-End" может быть только государственный проект.

Второе — техническое. Для полного (глубокого) импортозамещения при создании системы ЧПУ класса "Hi-End" отсутствуют необходимые отечественные программные и аппаратные средства: операционные системы реального времени, инструментальные средства разработки программного обеспечения, электронные компоненты и сборки из них, включая их встроенное программное обеспечение (процессорные платы, платы сетевых интерфейсов и т. п.). При преследовании цели полного импортозамещения задача выходит далеко за рамки собственно разработки системы ЧПУ, и ее решение в современных условиях представляется утопичным.

В этих условиях единственно возможной формой создания в обозримые сроки отечественной системы ЧПУ класса "Hi-End" является комплексный государственный проект (или последовательная серия таких проектов) с концентрацией усилий разработчиков из разных российских организаций и соблюдением принципов импортозамещения "первого уровня":

- использование импортных технических (программных и аппаратных) средств, не отнесенных мировым сообществом к технологиям двойного назначения, т. е. пока не подлежащих экспортному контролю со стороны стран-поставщиков;
- использование зарубежных программных средств, находящихся в свободном доступе (типа операционной системы Linux);
- использование импортных аппаратных средств (электронных компонентов и сборок из них), выпускаемых серийно (по возможности — массово) и не единственным зарубежным производителем.

Именно в такой форме МГТУ "Станкин" в 2000 г. поставил перед собой задачу создания универсальной отечественной системы ЧПУ класса "Hi-End", располагая в тот момент весьма ограниченными кадровыми и финансовыми ресурсами.

Создание систем управления в МГТУ "Станкин"

До 2000 г. на протяжении 20 предыдущих лет ситуация складывалась так, что разные коллективы разработчиков МГТУ "Станкин" практически автономно вели разработки систем управления для решения разного типа задач. В результате был создан ряд внедренных на промышленных предприятиях разработок:

- системы управления серии UCS (UCS-2, USC-M-2000 [3]) для промышленных роботов;
- контроллер цифрового привода USCNet и серия интеллектуальных цифровых сервоприводов на его основе;
- однокомпьютерная система ЧПУ WinPCNC [4] для трех- и четырехкоординатных станков;
- серия контроллеров электроавтоматики "Малыш";
- программный контроллер движения для станка лазерной графики ArtNC.

Эти разработки, начиная с 2000 г. и особенно с началом реализации в 2007 г. важнейшего инновационного проекта государственного значения "Разработка комплекса наукоемких комплектующих изделий, обеспечивающих конкурентоспособность современного механообрабатывающего оборудования" по заказу Министерства промышленности и торговли Российской Федерации (государственный контракт от 24.12.08 г. № 8411.0816900.05.593), стали объединяться в рамках общей концепции многофункциональной отечественной системы ЧПУ (рис. 1, см. вторую сторону обложки).

Создание базового ядра для многофункциональной системы ЧПУ потребовало систематизации предъявляемых к ЧПУ требований в рамках модульной организации аппаратно-программного обеспечения системы управления (рис. 2) [5].

Платформенезависимость — подразумевает переносимость (портируемость) программного обес-

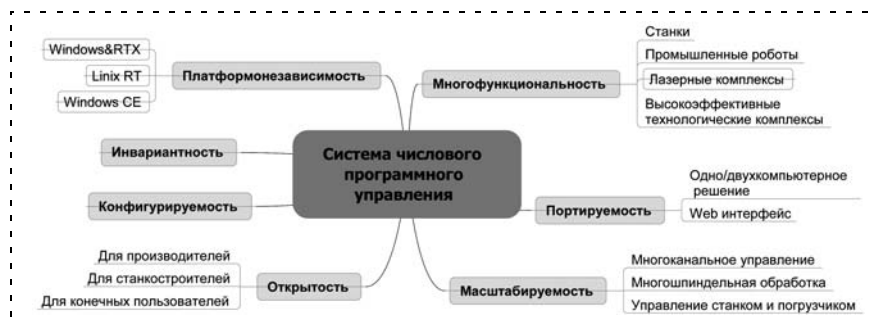


Рис. 2. Ключевые требования, предъявляемые к отечественной системе ЧПУ класса "Hi-End"

печения ядра системы ЧПУ на разные платформы. Это может быть, например, персональный компьютер промышленного или офисного исполнения с операционной системой реального времени Linux или Windows с расширением RTX, а также одноплатный компьютер с операционной системой Windows CE.

Инвариантность — подразумевает многообразие вариантов исполнения распределенной системы. Это может быть решение на базе собственного аппаратного обеспечения или на базе покупной аппаратуры, также допускаются смешанные варианты, когда используется часть собственного аппаратного обеспечения, а часть приобретается у независимых поставщиков.

Открытость — для производителей систем ЧПУ это, прежде всего, возможность встраивать готовые программные и аппаратные решения сторонних производителей. Для станкостроителей — это возможность разрабатывать собственный интерфейс оператора, создавать станочные циклы и интегрировать внешние диагностические решения на конкретном станке. Для конечного пользователя открытость означает возможность реализовывать собственные технологии, настраивать систему ЧПУ под конкретный технологический процесс и встраивать в систему ЧПУ прикладное программное обеспечение.

Масштабируемость системы — позволяет "клонировать" существующую функциональность несколько раз; обеспечивается за счет многоканальности системы ЧПУ. Оси закрепляются за определенным каналом управления; на каждом канале может быть запущена своя управляющая программа, а выполнение их происходит параллельно. Чаще всего эта функциональность используется для многошпиндельной обработки или для совместного управления станком и погрузчиком.

Многофункциональность — обеспечивает возможность адаптации одной и той же базовой системы управления для разного типа оборудования:

токарных, фрезерных или шлифовальных станков, обрабатывающих центров или высокоэффективных технологических комплексов, реализующих перспективные технологии обработки.

Конфигурируемость — предполагает возможность конфигурирования системы как под разные технические и технологические задачи, так и конфигурирование в разные ценовые категории.

На основе предъявляемых требований была определена архитектура обобщенной системы управления (рис. 3), которая включает терминальную часть, работающую в машинном времени (как правило, под операционной системой семейства Windows), и ядро, функционирующее в реальном времени (под операционной системой Linux RT, дополненной рядом оригинальных программных модулей).

Открытость архитектуры системы управления сосредоточена в уровнях абстракции, обеспечивающих независимость ядра системы управления от конкретной реализации разделяемого уровня [6]. Абстракция на уровне входного языка позволяет использовать любой язык описания обработки детали для передачи данных в интерполятор. Абстракция на уровне канала связи обеспечивает подключение к ядру через сервер данных нескольких терминальных клиентов, в том числе и удаленных терминалов, подключенных через сеть Интернет. Абстракция на уровне приводов и электроавтоматики обеспечивает независимость ядра системы управления от интерфейсов связи с контроллером приводов и электроавтоматики.

По изложенной концепции в 2007—2009 гг. в рамках важнейшего инновационного проекта государственного значения "Разработка и освоение производства гаммы отечественных универсальных технологических роботов для массовых автоматизированных производств гражданской машиностроительной продукции" по заказу Министерства промышленности и торговли Российской Федерации была реализована система управления технологическими роботами (рис. 4, см. вторую сторону обложки).

Разработанной системой управления оснащаются созданные совместно с ОАО "АВТОВАЗ" в рамках указанного проекта технологические роботы ТУР-15, ТУР-30, ТУР-150 и ТУР-350 (рис. 5, см. вторую сторону обложки).

Специфичными являются модуль кинематических трансформаций, осуществляющий обратное преобразование координат, пульт управления, подключаемый к компьютеру реального времени; терминал, реализующий, в первую очередь, функции перепрограммирования, диагностики и запуск в эксплуатацию РТК.

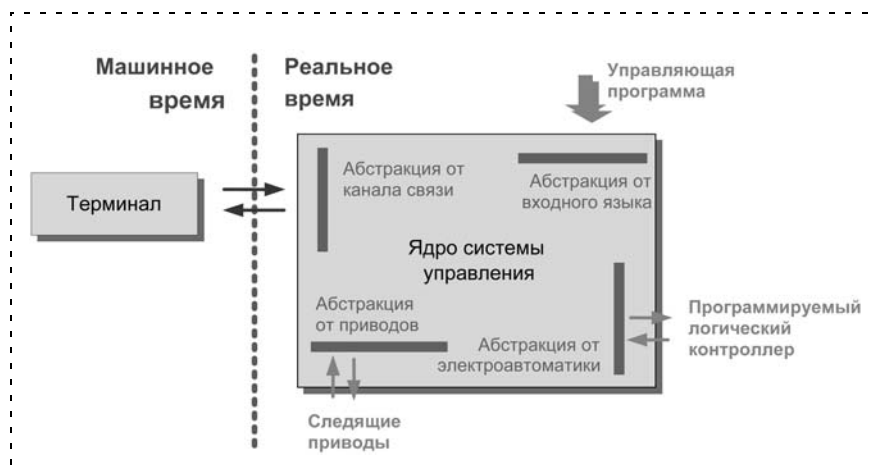


Рис. 3. Архитектурная модель многофункциональной системы ЧПУ

В 2010 г. завершается создание системы ЧПУ АксиОМА Ctrl для металлообрабатывающего оборудования с функцией 5-координатной обработки. Специальным является модуль обработки управляющей программы, созданной на языке ISO-7bit или на языке высокого уровня (рис. 6).

В результате интерполяции данных формируются управляющие команды для приводов и электроавтоматики. Информация о ходе выполнения управляющей программы, текущем состоянии приводов и электроавтоматики передается в сервер данных для отображения на интерфейсе пользователя.

Опытный образец системы ЧПУ АксиОМА Ctrl, установленной на фрезерный обрабатывающий центр MC-400 производства ОАО "АВТОВАЗ" (ПТОО АВТОВАЗ), демонстрировался на выставке "Оборудование, приборы и инструменты для металлообрабатывающей промышленности МЕТАЛЛО-ОБРАБОТКА-2010" (рис. 7).

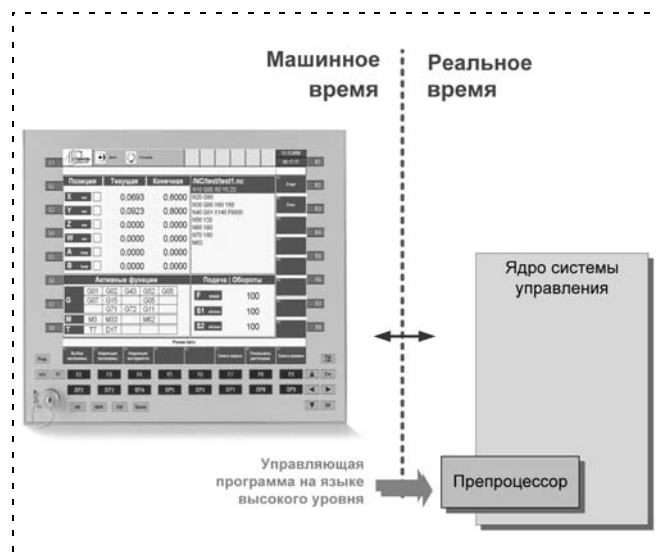


Рис. 6. Архитектурная модель системы ЧПУ



Рис. 7. Система ЧПУ АксиОМА Ctrl на фрезерном обрабатывающем центре MC-400

В 2010 г. начата разработка еще целого ряда версий созданной системы ЧПУ, опытные образцы которых будут изготовлены и испытаны в составе соответствующего оборудования во втором полугодии 2011 г.:

- система управления установками для 5-координатной лучевой обработки (гидроабразивной, лазерной и электронно-лучевой) — в составе разрабатываемой совместно с ОАО "НИАТ", ОАО "ЭНИМС" и ОАО "Савеловский машиностроительный завод" 5-координатной установки для гидроабразивной резки;
- система управления разрабатываемыми совместно с ОАО "НИАТ" установками для селективного послойного лазерного спекания деталей из металлических и керамических порошков;
- система управления создаваемой совместно с ОАО "НИИИзмерения" координатно-измерительной машиной субмикронной точности;
- система управления зубофрезерными станками, входящими в создаваемую совместно с ОАО "САСТА" (Сасовский станкостроительный завод) гамму станков для обработки цилиндрических зубчатых колес максимальным диаметром 200, 800 и 1250 мм;
- система управления создаваемым совместно с ОАО "НИАТ" роботизированным комплексом для изготовления крупногабаритных деталей из полимерных композиционных материалов методом выкладки;
- система адаптивного управления создаваемым совместно с ФГУП "Самарский электромеханический завод" роботизированным комплексом для лазерной сварки тонколистовых крупногабаритных сложнопрофильных конструкций.

Работа по развитию созданной импортозамещающей системы ЧПУ класса "Hi-End" планируется продолжить в рамках открывающейся в 2011 г. Подпрограммы "Развитие отечественного станкостроения и инструментальной промышленности" на 2011—2016 гг. к Федеральной целевой программе "Национальная технологическая база".

Заключение

Независимость российского машиностроения в области систем ЧПУ технологическим оборудованием обеспечивается посредством создания многофункциональной системы ЧПУ класса "Hi-End", выполненной на базе общего ядра с открытой модульной архитектурой, позволяющего адаптировать систему управления под широкий круг прикладных задач. Частные решения, такие как система управления промышленным роботом, система ЧПУ для металлообрабатывающего оборудования в различных версиях, система управления лазерной или гидроабразивной установкой, реализуются посред-

ством конфигурации ядра и интеграции специфич- ных прикладных программных модулей.

Задача следующего этапа мероприятий по углуб- лению импортозамещения в области систем ЧПУ — постепенно обеспечить программную и аппаратную компонентную базу отечественного производства.

Список литературы

1. Григорьев С. Н. Кадровое обеспечение российского машиностроения // Вестник МГТУ "Станкин". 2009. № 1. С. 5—8.
2. Мартинов Г. М. Современные тенденции развития компьютерных систем управления технологического оборудования // Вестник МГТУ "Станкин". 2010. № 1. С. 74—79.

3. Андреев А. Г., Григорьев С. Н. Построение компьютер- ных систем программного управления мехатронными устрой- ствами по модульному принципу // Мехатроника, автоматиза- ция, управление. 2005. № 10. С. 8—13.

4. Сосонкин В. Л., Мартинов Г. М. Системы числового про- граммного управления: учеб. пособие. М.: Логос, 2005.

5. Григорьев С. Н., Мартинов Г. М. Перспективы развития распределенных гетерогенных систем ЧПУ децентрализован- ными производствами // Автоматизация в промышленности. 2010. № 5. С. 4—8.

6. Мартинов Г. М., Мартинова Л. И., Григорьев А. С. Спе- цифика разработки программного обеспечения для систем управления технологическим оборудованием в реальном време- ни // Спецвыпуск Т-Comm, июль 2009. С. 121—124.

7. Подураев Ю. В. Актуальные проблемы мехатроники // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 4. С. 50—55.

УДК 621:658.011.56

М. В. Бобырь, канд. техн. наук, доц.,
Юго-западный государственный университет
fregat_mn@rambler.ru

Модифицированный алгоритм нечетко-логического вывода в задачах управления оборудованием с ЧПУ*

Показано, что при реализации стандартных нечетко- логических алгоритмов вывода существует ряд недостатков, которые снижают быстрдействие интеллектуальных систем управления, реализованных на основе теории нечетких множеств. Предложен модифицированный алгоритм нечетко-логического вывода, позволяющий повысить быстрдействие за счет уменьшения времени на обработку пустых результатов. Приведен пример, поясняющий суть разрабо- танного алгоритма.

Ключевые слова: нечеткая логика, нечетко-логический вывод, автоматизированная система управления

Введение

Одним из главных требований, предъявляемых к современному механообрабатывающему оборудованию с ЧПУ, является наличие высокоскоростных режимов. Однако при их выборе существует противоречие между большой скоростью и мощностью резания. Например, при обработке изделий на оборудовании с ЧПУ у высокоскоростного станка узлы перемещаются от одной точки к другой значительно быстрее, чем на станке, имеющем медленную скорость. Но когда на высокоскоростном станке необходимо переместить узлы на небольшое расстояние, то получается, что из-за ускорения нельзя переместить узел с такой же большой скоростью, как на дальнее расстояние. Проведенные исследо-

вания в данной области показали, что между уско- рением и мощностью существует экспоненциаль- ная зависимость, из которой следует, что для уве- личения ускорения в два раза необходимо в четыре раза увеличить мощность резания, и наоборот. Таким образом, необходимость нахождения компромисса между скоростью и мощностью при технологических операциях на оборудовании с ЧПУ снижает быстрдействие автоматизированных систем управления.

До настоящего времени в автоматизированных системах управления точностью при механической обработке изделий использовали ПИД-регуляторы или регуляторы, реализованные на робастных принципах управления. Наиболее существенным недостатком вышеуказанных методов является их невысокое быстрдействие. Например, ход техно- логического процесса контролируется с помощью двух 10-битных датчиков. При этом число слов, поступающих от одного датчика, составляет 1024. В случае коррекции технологического процесса необходимо перебрать все возможные варианты, поступающие от двух датчиков в количестве $1024 \cdot 1024 = 1\,048\,576$ слов. При этом для выбора управляющего параметра в целях передачи его на исполнительные механизмы оборудования с ЧПУ необходимо решить порядка 20 дифференциаль- ных уравнений, т. е. чтобы удовлетворить такому показателю качества, как надежность, для выбора оптимальных параметров необходимо выполнить порядка 20 млн операций в единицу времени. В стан- ках с ЧПУ, как правило, используются 8-битные контроллеры (Pis, Atmega), способные в секунду выполнить порядка 10...20 млн операций. Следова- тельно, выбор оптимальных параметров займет около одной секунды, а это недопустимо для кор- рекции процесса механической обработки изделий в режиме реального времени. При этом с увеличе- нием числа контролируемых параметров быстр- действие системы снижается.

* Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МК-470.2009.8.

Традиционные нечетко-логические алгоритмы управления

Для решения вышеуказанных проблем в настоящее время широко используются принципы нечетко-логического управления, позволяющие в режиме реального времени эффективно контролировать наличие случайных погрешностей [1]. Быстродействие нечетко-логических систем не превышает несколько десятых микросекунды, так как для нахождения управляющего параметра необходимо манипулировать только с единственным значением, поступающим от сенсорной системы в данный момент времени.

Основой традиционных нечетко-логических алгоритмов управления является *композиционное правило Заде* [2], которое формулируется следующим образом:

если знание эксперта отражено в виде причинно-следственной связи между предпосылкой X и заключением Y в виде нечетко-логического отношения $R = X \Rightarrow Y$, причем X и Y — универсальные множества, а множество R рассматривается как нечеткое подмножество прямого произведения $X \times Y$, и A — множество, описывающее наблюдение контролируемого процесса, при этом множества A и R являются подмножествами X и $X \times Y$, тогда из нечетких множеств A и R следует *нечеткое множество* $B = A \circ R = A \circ (X \times Y)$, где \circ — операция композиции, имеющее функцию принадлежности

$$\mu_B(y) = \bigvee_{x \in X} (\mu_A(x) \wedge \mu_R(x, y)).$$

При этом матрица R строится следующим способом:

$$R = X \circ Y = \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{1n} \\ \vdots & r_{ij} & \vdots \\ r_{m1} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix},$$

где r_{ij} — произвольный элемент композиционной матрицы, который рассчитывается [3] по формуле

$$r_{ij} = x_i \wedge y_j,$$

где \wedge — операция взятия минимум (\min).

Получение новых значений определяется как

$$y'_{1\dots n} = \bigvee (x'_i \wedge r_{ij}) = \max(x'_i \min r_{ij}).$$

Рассмотрим пример. Дано нечеткое правило "Если $x = X$, то $y = Y$, где

$$X = \{<10; 0,1>, <20; 0,3>, <30; 0,7>, <40; 0,8>, <50; 1>\};$$

$$Y = \{<1; 0,2>, <2; 0,6>, <3; 0,9>, <4; 1>\}.$$

Необходимо определить значение выходной переменной y' при наблюдении входной переменной $x' = A = \{<10; 0,1>, <20; 1>, <30; 0,5>, <40; 0,2>, <50; 0,1>\}$.

Сначала необходимо построить матрицу R , которая описывает знания эксперта в виде причинно-следственной связи между предпосылкой X и заключением Y :

$$R = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 10 \\ 20 \\ 30 \\ 40 \\ 50 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 \\ 0,2 & 0,3 & 0,3 & 0,3 \\ 0,2 & 0,6 & 0,7 & 0,7 \\ 0,2 & 0,6 & 0,8 & 0,8 \\ 0,2 & 0,6 & 0,9 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}.$$

Найдем значение выходной переменной:

$$\begin{aligned} y' = A \circ R &= (0,1; 1; 0,5; 0,2; 0,1) \circ \begin{bmatrix} 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 \\ 0,2 & 0,3 & 0,3 & 0,3 \\ 0,2 & 0,6 & 0,7 & 0,7 \\ 0,2 & 0,6 & 0,8 & 0,8 \\ 0,2 & 0,6 & 0,9 & 1 \end{bmatrix} = \\ &= (0,2; 0,5; 0,5; 0,5). \end{aligned}$$

Получается $y' = \{<1; 0,2>, <2; 0,5>, <3; 0,5>, <4; 0,5>\}$.

Используя метод центра тяжести, дефазифицируем полученный результат:

$$y' = \frac{(0,2 \cdot 1) + (0,5 \cdot 2) + (0,5 \cdot 3) + (0,5 \cdot 4)}{0,2 + 0,5 + 0,5 + 0,5} = 2,76.$$

Существенным недостатком композиционного правила Заде является необходимость наблюдения в течение определенного времени за поведением входной переменной x' , что не позволяет использовать данный алгоритм в режиме реального времени. Иными словами, данное правило способно адекватно реагировать только на дискретное поведение входной переменной за определенный промежуток времени.

Подобного недостатка лишены общепринятые нечетко-логические алгоритмы Мамдани, Сугено, Тсукамото, Ларсена и упрощенный алгоритм, в которых для расчета выходного параметра используются только контролируемые величины, поступающие от сенсорных систем активного контроля в данный момент времени. Как правило, алгоритмы нечетко-логического вывода решаются за шесть этапов: формирование баз знаний на основе нечетких правил (НП); фаззификация входных параметров; агрегация предпосылок в НП; композиция заключений в НП; аккумуляция НП; дефазификация НП [4].

Анализ эффективности общепринятых нечетко-логических алгоритмов

При реализации традиционных нечетко-логических алгоритмов, использующихся в различных интеллектуальных автоматизированных системах управления, например, в контуре управления оборудованием с ЧПУ [5], существует ряд недостатков, снижающих время вывода результирующего значения.

Во-первых, это наличие *пустых решений*, число которых увеличивается с ростом числа нечетких правил, составляющих основу баз знаний. Пустые решения появляются в заключениях нечетко-логических выводов при переборе термов входных переменных в зависимости от конкретных правил управления, при этом они не участвуют в дальнейших математических расчетах, но существенно снижают быстродействие нечетко-логической системы управления. Например, заданы две входные нечеткие переменные A и B , имеющие по пять термов: $A = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\}$ и $B = \{b_1, b_2, b_3, b_4, b_5\}$. Пусть задана предпосылка нечетко-логического правила: *Если "a есть a_1 " И "b есть b_5 ".* В данный момент времени от двух датчиков, контролирующих поведение входных переменных, поступили значения, принадлежащие термам a_3 и b_3 , тогда вышеуказанная предпосылка нечетко-логического правила приведет к пустому решению, которое будет анализироваться системой нечетко-логического вывода, но никаким образом не будет влиять на расчет выходного параметра.

Во-вторых, это наличие *нулевых участков* у термов, описывающих входные и выходные нечеткие переменные, которые появляются при программной реализации алгоритмов нечетко-логического вывода. То есть когда необходимо выполнить операцию взятия максимума и/или минимума между двумя термами, программа последовательно перебирает по оси абсцисс через определенный шаг все возможные значения нечеткой переменной, заданной на универсальном множестве, а не только те значения универсального множества, где функция принадлежности (значения по оси ординат) отлична от нуля. Например, нечеткое множество задано на универсальном множестве [100, 180], а один из термов нечеткой переменной задан на участке от 120 до 140. Естественно, что значение функции принадлежности для данного терма будет отлично от нуля только в диапазоне от 120 до 140, а при программной реализации (Fuzzy ToolBox, Fuzzy Tech) во время операции взятия минимума данный терм будет анализироваться не только на участке от 120 до 140, но и на участках от 100 до 120 и от 140 до 180, что ведет к появлению пустых участков, которые анализируются системой нечетко-логического вывода, но не влияют на расчет выходного пара-

метра, что снижает быстродействие традиционных нечетко-логических алгоритмов.

Таким образом, актуальной является задача, позволяющая при реализации нечетко-логических выводов устранять появление пустых решений и нулевые участки.

Модифицированный нечетко-логический алгоритм

Разберем принцип действия модифицированного алгоритма на примере управления токарной операцией при механической обработке изделий на оборудовании с ЧПУ в режиме реального времени. Необходимо последовательно выполнить следующие шаги.

Шаг 1. Сформировать функции принадлежности термов двух входных переменных: силы резания — P ; диаметра — D , а также выходной переменной — скорости резания — V :

$$P = \{ \langle p, \mu(p) \rangle \}, D = \{ \langle d, \mu(d) \rangle \}, V = \{ \langle v, \mu(v) \rangle \}, \quad (1)$$

где p — числовые значения силы резания; $\mu(p) \rightarrow [0, 1]$ — соответствующие силе резания значения функции принадлежности (из интервала от 0 до 1); d — числовые значения диаметра обрабатываемой детали; $\mu(d) \rightarrow [0, 1]$ — соответствующие диаметру обрабатываемой детали значения функции принадлежности (из интервала от 0 до 1); v — числовые значения скорости резания; $\mu(v) \rightarrow [0, 1]$ — соответствующие скорости резания значения функции принадлежности (из интервала от 0 до 1).

Шаг 2. Сформировать базу знаний, отражающую взаимосвязь между входными и выходными параметрами, которая задается нечеткими правилами вида

$$\text{НП}_{1\dots n}: \text{Если } "x_1 = \alpha_{1j}" \theta "x_2 = \alpha_{2j}" \theta \dots \theta "x_m = \alpha_{mj}" \\ \text{То } "y_2 = \beta_j", \quad i = 1\dots m, j = 1\dots n,$$

где α_{ij} — нечеткий терм, которым оценивается нечеткая переменная x_i в j -м правиле; β_j — заключение в j -м правиле; m — число термов; n — число правил; θ — знак, обозначающий нечеткую логическую операцию (И, ИЛИ) по формуле

$$\bigcup_{j=1}^n \left(\bigcap_{i=1}^m x_i = \alpha_{ij} \text{ с весом } f_j \right) \Rightarrow y = \beta_j, \\ i = 1\dots m, j = 1\dots n, \quad (2)$$

где f_i — весовой коэффициент, если не задан, то по умолчанию $f_i = 1$.

Шаг 3. Построить матрицу и определить максимальные значения коэффициентов. С помощью операции нечеткой композиции рассчитать выходные значения скорости резания в виде новых термов функций принадлежности (табл. 1).

№ термина	Коэффициенты					max	Выходные значения
						Нечеткая композиция	
v_1	b_{25}					$b'_1 = b_{25}$	$\mu'(v)_1 = \min\{b'_1; \mu(v)_1\}$
v_2	b_{20}	b_{24}				$b'_2 = \max(b_{20}, b_{24})$	$\mu'(v)_2 = \min\{b'_2; \mu(v)_2\}$
v_3	b_{15}	b_{19}	b_{23}			$b'_3 = \max(b_{15}, b_{19}, b_{23})$	$\mu'(v)_3 = \min\{b'_3; \mu(v)_3\}$
v_4	b_{10}	b_{14}	b_{18}	b_{22}		$b'_4 = \max(b_{10}, b_{14}, b_{18}, b_{22})$	$\mu'(v)_4 = \min\{b'_4; \mu(v)_4\}$
v_5	b_5	b_9	b_{13}	b_{17}	b_{21}	$b'_5 = \max(b_5, b_9, b_{13}, b_{17}, b_{21})$	$\mu'(v)_5 = \min\{b'_5; \mu(v)_5\}$
v_6	b_4	b_8	b_{12}	b_{16}		$b'_6 = \max(b_4, b_8, b_{12}, b_{16})$	$\mu'(v)_6 = \min\{b'_6; \mu(v)_6\}$
v_7	b_3	b_7	b_{11}			$b'_7 = \max(b_3, b_7, b_{11})$	$\mu'(v)_7 = \min\{b'_7; \mu(v)_7\}$
v_8	b_2	b_6				$b'_8 = \max(b_2, b_6)$	$\mu'(v)_8 = \min\{b'_8; \mu(v)_8\}$
v_9	b_1					$b'_9 = b_1$	$\mu'(v)_9 = \min\{b'_9; \mu(v)_9\}$

Примечание. Число строк матрицы равно числу термов выходной переменной V — скорости резания.

Коэффициенты b_1, \dots, b_n определяются по формуле

$$b'_k = [\min(p'_{ij}; b'_{ij})]f_i = a'_n f_i, \quad (3)$$

где $k = 9$ — число термов у выходной переменной, при этом

$$\begin{aligned} a'_1 &= \min(p'_1, d'_1), a'_2 = \min(p'_1, d'_2), \\ a'_3 &= \min(p'_1, d'_3), a'_4 = \min(p'_1, d'_4), \\ a'_5 &= \min(p'_1, d'_5), a'_6 = \min(p'_2, d'_1), \\ a'_7 &= \min(p'_2, d'_2), a'_8 = \min(p'_2, d'_3), \\ a'_9 &= \min(p'_2, d'_4), a'_{10} = \min(p'_2, d'_5), \\ a'_{11} &= \min(p'_3, d'_1), a'_{12} = \min(p'_3, d'_2), \\ a'_{13} &= \min(p'_3, d'_3), a'_{14} = \min(p'_3, d'_4), \\ a'_{15} &= \min(p'_3, d'_5), a'_{16} = \min(p'_4, d'_1), \\ a'_{17} &= \min(p'_4, d'_2), a'_{18} = \min(p'_4, d'_3), \\ a'_{19} &= \min(p'_4, d'_4), a'_{20} = \min(p'_4, d'_5), \\ a'_{21} &= \min(p'_5, d'_1), a'_{22} = \min(p'_5, d'_2), \\ a'_{23} &= \min(p'_5, d'_3), a'_{24} = \min(p'_5, d'_4), \\ a'_{25} &= \min(p'_5, d'_5), \end{aligned}$$

где $p' = (p'_1, p'_2, p'_3, p'_4, p'_5)$, $d' = (d'_1, d'_2, d'_3, d'_4, d'_5)$ — фаззифицированные векторы входных переменных, полученные после обработки информации, поступающей от датчиков активного контроля оборотования с ЧПУ в режиме реального времени, с учетом того, что текущее значение силы резания p является аргументом $\mu(p)$, а текущее значение диаметра обрабатываемой детали D является аргументом $\mu(d)$, что позволяет найти количественное значение из интервала $[0, 1]$ для $p' = \mu(p)$ и $d' = \mu(d)$.

Шаг 4. Проводится логическое объединение новых термов функции принадлежности, полученных на предыдущем шаге (табл. 1), и формируется нечеткий вектор функций принадлежности V' , имеющий функцию принадлежности

$$\mu_{V'}(v') = \bigcup_v \begin{cases} \int_{v \in \sup V_1} \{\mu'(v)_1 f_1\} \wedge \sum_{v \in \sup V_1} \mu_{V_1}(v); \\ \int_{v \in \sup V_2} \{\mu'(v)_2 f_2\} \wedge \sum_{v \in \sup V_2} \mu_{V_2}(v); \\ \int_{v \in \sup V_3} \{\mu'(v)_3 f_3\} \wedge \sum_{v \in \sup V_3} \mu_{V_3}(v); \\ \dots \\ \int_{v \in \sup V_9} \{\mu'(v)_9 f_9\} \wedge \sum_{v \in \sup V_9} \mu_{V_9}(v). \end{cases} \quad (4)$$

Шаг 5. Нечеткий вектор функций принадлежности V' преобразуется в единственное четкое значение по методу центра тяжести:

$$v'' = \frac{\sum_{i=1}^9 v_i \mu'(v)_i}{\sum_{i=1}^9 \mu'(v)_i}. \quad (5)$$

Работу модифицированного нечетко-логического алгоритма, определяемого формулами (1)–(6), поясним на примере.

Моделирование работы модифицированного алгоритма нечетко-логического вывода

В качестве примера разберем управление скоростью резания при чистовом проходе в ходе токарной обработки детали в зависимости от текущего значения силы резания p , полученного от силовметрического датчика, и диаметра обрабатываемой поверх-

ности детали d , полученного от оптического датчика, входящих в систему активного контроля оборудования с ЧПУ.

Шаг 1. Сформируем по формуле (1) функции принадлежности термов двух входных переменных: силы резания $P = (p_1, p_2, p_3, p_4, p_5)$ (рис. 1, а), диаметра $D = (d_1, d_2, d_3, d_4, d_5)$, (рис.1, б); а также выходной переменной: скорости резания $V = (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8, v_9)$ (рис. 1, в).

Шаг 2. Построим нечеткую базу знаний, состоящую из 25 нечетких правил управления, используя зависимость (2), отражающую взаимосвязь между входными и выходными параметрами (табл. 2).

Шаг 3. Пусть силометрический датчик определил, что сила резания — 88 Н (рис. 1, а). Пусть оптический датчик определил значение диаметра обрабатываемой детали — 19,994 мм (рис. 1, б). Используя формулу (3), находим коэффициенты $b_{1...n}$

$$p' = (p'_1, p'_2, p'_3, p'_4, p'_5) = (0,54; 0,8; 0; 0; 0),$$

$$d' = (d'_1, d'_2, d'_3, d'_4, d'_5) = (0,007; 0,6; 0,4; 0; 0).$$

и заполняем матрицу (табл. 3).

Затем отбираем нечеткие правила, которые имеют пересечения. Это НП с номерами 1, 2, 3, 6, 7 и 8 (табл. 4). Здесь отсекаются остальные 19 НП, которые ведут к появлению пустых решений.

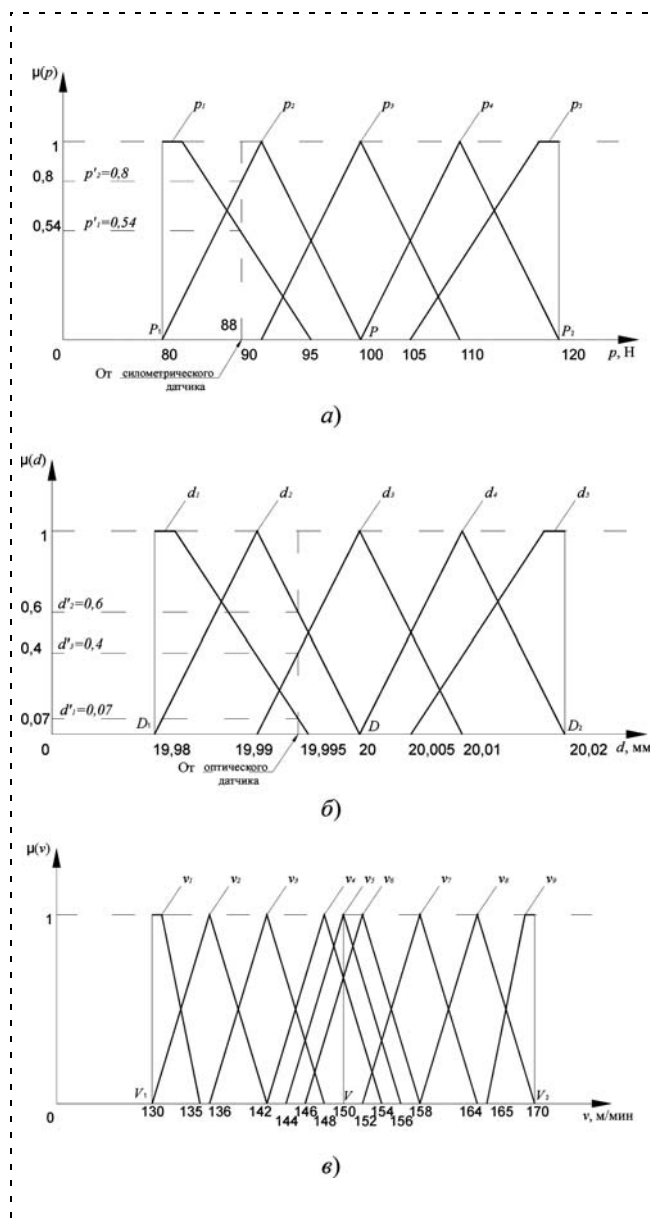


Рис. 1. Графики функций принадлежности:
а — входная переменная сила резания; б — входная переменная диаметр; в — выходная переменная скорость резания

Таблица 2

НП	Если	То	НП	Если	То	НП	Если	То			
НП ₁	p_1	d_1	v_9	НП ₁₀	p_2	d_5	v_4	НП ₁₉	p_4	d_4	v_3
НП ₂	p_1	d_2	v_8	НП ₁₁	p_3	d_1	v_7	НП ₂₀	p_4	d_5	v_2
НП ₃	p_1	d_3	v_7	НП ₁₂	p_3	d_2	v_6	НП ₂₁	p_5	d_1	v_5
НП ₄	p_1	d_4	v_6	НП ₁₃	p_3	d_3	v_5	НП ₂₂	p_5	d_2	v_4
НП ₅	p_1	d_5	v_5	НП ₁₄	p_3	d_4	v_4	НП ₂₃	p_5	d_3	v_3
НП ₆	p_2	d_1	v_4	НП ₁₅	p_3	d_5	v_3	НП ₂₄	p_5	d_4	v_2
НП ₇	p_2	d_2	v_3	НП ₁₆	p_4	d_1	v_6	НП ₂₅	p_5	d_5	v_1
НП ₈	p_2	d_3	v_2	НП ₁₇	p_4	d_2	v_5				
НП ₉	p_2	d_4	v_1	НП ₁₈	p_4	d_3	v_4				

Таблица 3

№ терма	Коэффициенты					Мах
v_1	0					$b'_1 = 0$
v_2	0	0				$b'_2 = 0$
v_3	0	0		0		$b'_3 = 0$
v_4	0	0		0	0	$b'_4 = 0$
v_5	0	0		0	0	$b'_5 = 0$
v_6	0	$\min(0,8; 0,4)$		0	0	$b'_6 = 0,4$
v_7	$\min(0,54; 0,4)$	$\min(0,8; 0,6)$		0		$b'_7 = 0,6$
v_8	$\min(0,54; 0,6)$	$\min(0,8; 0,007)$				$b'_8 = 0,54$
v_9	$\min(0,54; 0,007)$					$b'_9 = 0,007$

Примечание. Весовые коэффициенты $f_i = 1$, поэтому не отражены в формулах.

Таблица 4

НП	Если	То
НП ₁	p_1	d_1
НП ₂	p_1	d_2
НП ₃	p_1	d_3
НП ₆	p_2	d_1
НП ₇	p_2	d_2
НП ₈	p_2	d_3

Далее рассчитываем новые значения функции принадлежности выходной величины (см. табл. 1):
 $\mu'(v)_1 = 0, \mu'(v)_2 = 0, \mu'(v)_3 = 0, \mu'(v)_4 = 0, \mu'(v)_5 = 0;$
 $\mu'(v)_6 = \min\{\max(0; 0,4; 0; 0); \mu(v)_6\}; \mu(v)_6 = \min\{0,4; \mu(v)_6\};$
 $\mu'(v)_7 = \min\{\max(0,4; 0,6; 0); \mu(v)_7\}; \mu(v)_7 = \min\{0,6; \mu(v)_7\};$
 $\mu'(v)_8 = \min\{\max(0,54; 0,007); \mu(v)_8\}; \mu(v)_8 = \min\{0,54; \mu(v)_8\};$
 $\mu'(v)_9 = \min\{\max(0,007); \mu(v)_9\}; \mu(v)_9 = \min\{0,007; \mu(v)_9\}.$

Графически результат выполнения данной операции приведен на рис. 2.

Шаг 4. По формуле (4) с учетом предыдущего шага проводим логическое объединение всех новых термов и формируем нечеткий вектор функций принадлежности V' . Результат операции графически показан на рис. 3.

Шаг 5. По формуле (5) нечеткий вектор функций принадлежности V' преобразуем в единственное четкое значение (рис. 4).

В целях упрощения вычислительной процедуры для расчета ограничимся семью точками, для более точного вычисления число точек нужно увеличить:

$$v'' = \frac{(148,5 \cdot 0,4) + (154,5 \cdot 0,4) + (155,5 \cdot 0,6) + (160,5 \cdot 0,6) + (161,5 \cdot 0,54) + (166 \cdot 0,54) + (170 \cdot 0,007)}{0,4 + 0,4 + 0,6 + 0,6 + 0,54 + 0,54 + 0,007} = 158,4 \text{ (м/мин)}.$$

Предложенный модифицированный нечетко-логический алгоритм устраняет недостатки, присущие традиционным алгоритмам, а именно, в нем не будет пустых решений и нулевых участков, что увеличивает его быстродействие по сравнению с общепринятыми в 2,5...3 раза.

Разработанный алгоритм особенно эффективен при прогнозировании точности обрабатываемых поверхностей деталей, например, позволяет более плавно регулировать перемещение рабочих органов оборудования с ЧПУ по трем линейным осям. Рассмотрим процесс фрезерования окружности с помощью трехкоординатного станка. Для перемещения рабочих органов по окружности необходимо рассчитать

перемещение режущего инструмента по семейству точек, расположенных вблизи окружности, т. е. не по самой окружности, а по ее хордам. При этом оборудование с ЧПУ, имеющее небольшие скорости резания, на окружности дает лыски или огранку, что значительно снижает точность обрабатываемых поверхностей деталей и ведет к появлению брака. Длина хорд при интерполяции рассчитывается с уче-

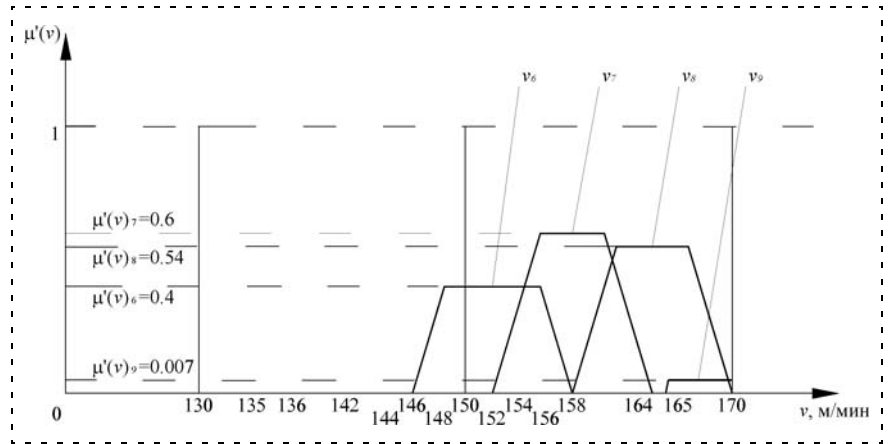


Рис. 2. Результат после выполнения операции нечеткой композиции

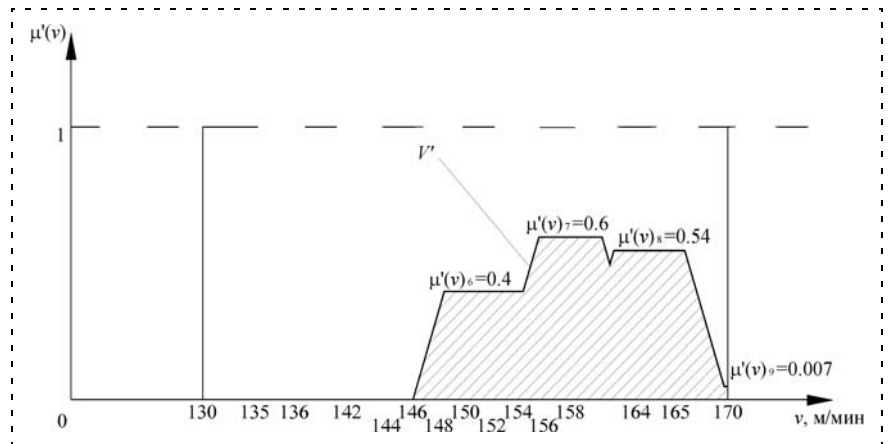


Рис. 3. Результат после логического объединения всех новых термов

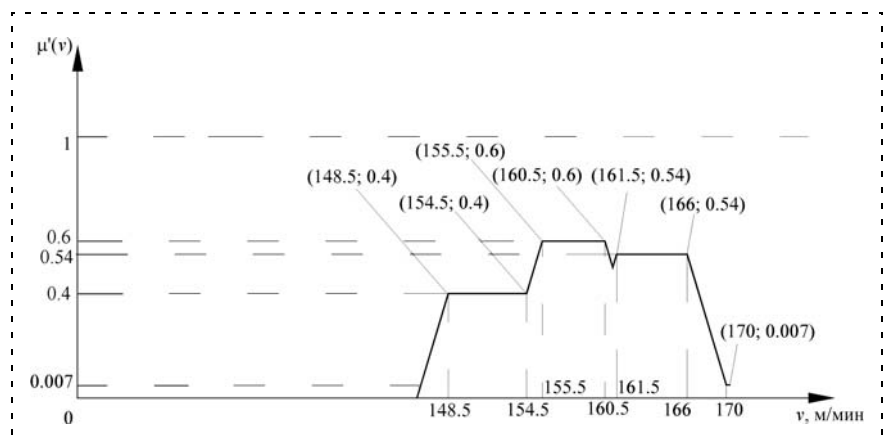


Рис. 4. Результат дефазификации

том быстродействия конкретной системы с ЧПУ. Так, при использовании диапазона подач 200 импульсов в минуту и временной дискретности 3 мс хорда составит 250 мкм. Наиболее скоростные промышленные системы с ЧПУ имеют быстродействие порядка 0,4 мс, и длина хорды составляет 35 мкм. Преимуществом высокоскоростных систем с ЧПУ является более точный контур обработанной поверхности вне зависимости от ее размера, который достигается за счет уменьшения времени до 0,4 мс на принятие управляющих решений.

Используя модифицированный алгоритм нечетко-логического вывода и с учетом инерционности технологической системы станок — приспособление — инструмент — деталь скорость принятия решений теоретически можно сократить с 0,4 до 0,1 мс, при этом длину хорды уменьшить до 10 мкм, а следовательно, увеличить точность обработки поверхностей детали в несколько раз.

Заключение

В статье указаны недостатки, присущие традиционным нечетко-логическим алгоритмам вывода, а также рассмотрена математическая модель модифицированного алгоритма. Приведенное численное моделирование позволяет оценить эффективность предложенного способа.

Список литературы

1. Тэрно Т., Асан К., Сугэно М. Прикладные нечеткие системы: М: Мир, 1993. 368 с.
2. Zadeh L. A. Fuzzy sets as basis for a theory of possibility // Fuzzy sets and systems. 1978. N 1. P. 3—28.
3. Бобырь М. В., Емельянов С. Г., Титов В. С. Теоретические основы построения автоматизированных систем управления технологическими процессами на основе нечеткой логики. Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2009. 232 с.
4. Яхьяева Г. Э. Нечеткие множества и нейронные сети: учебное пособие. М.: ИУИТ; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 316 с.
5. Бобырь М. В., Титов В. С., Беломестная А. Л. Стабилизация теплового режима в процессе резания // Мехатроника, автоматизация управление. 2010. № 6. С. 38—41.

УДК 681.527.7

Ю. Р. Никитин, канд. техн. наук, доц.,
И. В. Абрамов, д-р техн. наук, проф.,
Ижевский государственный
технический университет
nikitin@istu.ru

О построении системы диагностирования станков с ЧПУ

Рассматриваются три способа организации процесса диагностирования и алгоритм построения системы диагностирования станков с ЧПУ. Для вычисления интервалов диагностирования узлов станка предлагается использовать критерий, связывающий степень ответственности узлов станка и скорость протекания в них деградиационных процессов.

Ключевые слова: система диагностирования, станки с ЧПУ, способы организации процесса диагностирования, интервалы диагностирования

Как показывает анализ мнений заказчиков технологического оборудования, на первом месте в технических приоритетах стоит надежность оборудования. Многие заказчики считают важным наличие у оборудования системы диагностирования. Современные станки с ЧПУ имеют высокую степень автоматизации и представляют собой мехатронные системы. Выход из строя станков с ЧПУ приводит к существенным экономическим потерям. В связи с этим возникает важная задача построения эффективных систем диагностирования.

Станки с ЧПУ должны быть конкурентоспособными по качеству и стоимости. Это накладывает определенные ограничения на аппаратные и программные средства системы диагностирования. Некоторые вопросы диагностирования мехатронных систем и, в частности, станков с ЧПУ, рассмотрены в работах [1—4].

Возможны три способа организации процесса диагностирования: *параллельный, последовательный, комбинированный.*

При *параллельном* способе организации все узлы и элементы станка с ЧПУ диагностируются одновременно. Осуществляется непрерывный контроль технического состояния станка. Данный способ требует максимальных затрат — каждый узел и элемент имеют свою микросистему диагностирования. Параллельный способ организации процесса диагностирования целесообразно применять там, где имеется угроза здоровью и жизни человека, требуется высокая надежность, имеются узлы и элементы с высокими скоростями процессов деградации.

При *последовательном* способе все узлы и элементы станка с ЧПУ диагностируются по очереди. Осуществляется периодический контроль технического состояния. Узлы и элементы имеют датчики для измерения диагностических параметров. Имеется один контроллер для обработки информации, который последовательно обрабатывает информацию через определенные интервалы диагностирования. Данный способ требует минимальных затрат. Не-

Диагностические параметры для модулей, узлов и элементов станков с ЧПУ

№	Модуль, узел, элемент станка с ЧПУ	Диагностические параметры
1	Станины и направляющие	Температура, параметры движения, силовые параметры, временные интервалы, точность пространственных положений
2	Шарико-винтовые передачи	Температура, силовые параметры
3	Зубчатые передачи	Вибрация, параметры движения
4	Ременные передачи	Вибрация, параметры движения
5	Шпиндельные узлы	Температура, вибрация, параметры движения, точность пространственных положений
6	Подшипники	Температура, вибрация, точность пространственных положений
7	Резцедержка или устройства смены инструмента	Температура, вибрация, параметры движения, точность пространственных положений
8	Режущий инструмент	Температура, вибрация, точность пространственных положений, силовые параметры
9	Электрические двигатели	Ток, напряжение, мощность, температура, вибрация, параметры движения
10	Системы управления приводами	Ток, напряжение, мощность, температура
11	Датчики	Параметры движения, временные интервалы
12	Задняя бабка	Температура, точность пространственных положений

обходимо вычислять интервалы диагностирования узлов, элементов станка с ЧПУ.

Компромиссным вариантом является *комбинированный* способ. Наиболее ответственные узлы и элементы станка с ЧПУ диагностируются непрерывно, а остальные — по очереди через определенные интервалы диагностирования.

В качестве целевой функции при выборе способа организации процесса диагностирования необходимо использовать критерий минимума экономических потерь в процессе эксплуатации станка с ЧПУ. Экономические потери складываются из простоя оборудования, брака продукции, затрат на систему диагностики.

Предложен следующий алгоритм построения систем диагностирования станка с ЧПУ, состоящий из последовательности следующих шагов:

- декомпозиция станка с ЧПУ на узлы, элементы;
- определение диагностических параметров в узлах, элементах станка;
- выбор датчиков для измерения диагностических параметров;
- выбор интервалов диагностирования узлов, элементов станка.

Декомпозиция станка с ЧПУ на узлы, элементы. Механическая подсистема станка включает в себя следующие узлы: станины, суппорта, каретки, шарико-винтовые передачи, зубчатые передачи, ременные передачи, шпиндельные узлы, приводные валы, коробки скоростей, подачи, системы охлаждения, смазки, подшипники, устройства смены инструмента, режущий инструмент, прочие детали и узлы.

Электрическая и электромеханическая подсистемы станка включают в себя следующие узлы: двигатели привода главного движения, приводы подач, электрошкафы с электроаппаратурой.

Устройство ЧПУ включает следующие системы: системы управления приводами, датчики обратных связей.

Определение диагностических параметров в узлах, элементах станка. В табл. 1 приведены диагностические параметры для узлов и элементов станка с ЧПУ. Некоторые узлы токарных станков с ЧПУ и их параметры диагностирования рассмотрены в работе [1].

Выбор датчиков для измерения диагностических параметров. При выборе датчика для измерения диагностического параметра следует учитывать диапазон его измерения, условия работы объекта при измерении, доступности, технологии измерения. При этом диапазон измерений диагностических средств должен обеспечивать регистрацию минимальных и максимальных (предельных) значений диагностических параметров. Погрешность измерения датчиков должна составлять 1...2 %.

По возможности все датчики, особенно датчики вибрации и температуры, устанавливаются в непосредственной близости от объекта диагностирования.

Таблица 2

Диагностические параметры для модулей, узлов и элементов станков с ЧПУ и датчики для их измерений

№	Диагностический параметр	Датчики
1	Ток	Датчики тока до 100 А, рабочая частота 0...25 кГц
2	Напряжение	Датчики напряжения 10...500 В, рабочая частота 0...25 кГц
3	Мощность	Датчики мощности 0,5...20 кВт, рабочая частота 0...25 кГц
4	Температура	Датчики температуры 0...150 °С
5	Параметры движения	Акселерометры ±2g, энкодеры 10 000 импульсов/оборот
6	Силовые параметры	Тензометрические датчики силы до 10 кН
7	Временные интервалы	Таймеры в составе контроллера
8	Вибрация	Акселерометры ±2g, рабочая частота 1...25 кГц
9	Точность пространственных положений	Энкодеры 10 000 импульсов/оборот

Идеальным вариантом является наличие встроенных датчиков в элементах и узлах станка, например, мехатронные подшипники имеют встроенные датчики положения, угловой скорости, температуры и вибрации, а также микроконтроллер для преобразования информации в цифровой вид, ее обработки и передачи другим контроллерам. В табл. 2 приведены диагностические параметры и датчики для их измерений.

Выбор интервалов диагностирования узлов, элементов станка. Интервал диагностирования и последовательность анализа диагностических параметров зависят от степени ответственности узлов станка, времени их диагностирования и вероятности появления в них дефектов. Например, на практике встречается последовательность диагностирования элементов в порядке возрастания отношения времени, необходимого на диагностирование функционального элемента, к вероятности отказа данного элемента.

Интервал диагностирования узлов, элементов станка зависит от степени их ответственности и скорости протекания деградационных процессов.

Интервал диагностирования T_i для i -го узла, элемента станка вычисляется по формуле

$$T_i = T_c / K_i, \quad (1)$$

где T_c — время цикла диагностирования, определяемое аппаратными и программными возможностями устройства диагностирования; K_i — общий критерий, который вычисляется для i -го узла станка и учитывает его степень ответственности и скорость протекания в нем деградационных процессов.

Медленная скорость деградации объекта диагностирования определяется медленными процессами, вызывающими повреждения за месяцы, годы. Например, к таким процессам относятся изнашивание деталей, релаксация напряжений, коррозия.

Средняя скорость деградации объекта диагностирования определяется процессами, вызывающими повреждения за минуты, часы. Например, к таким процессам относятся тепловые процессы, изнашивание инструмента.

Высокая скорость или внезапный выход объекта диагностирования из строя определяется быстропротекающими процессами, вызывающими повреждения за секунды, доли секунд. Например, к таким процессам относятся вибрации, периодическое изменение сил резания, изменение сил трения.

Общий критерий K_i имеет две составляющие:

$$K_i = K_{otv} + K_{degr}, \quad (2)$$

где K_{otv} — коэффициент ответственности i -го узла, элемента, изменяется в диапазоне от 0 до 0,5 (0,5 — максимальная степень ответственности); K_{degr} — коэффициент, характеризующий скорость протекания деградационных процессов i -го узла, элемента, изменяется от 0 до 0,5 (0,5 — максимальная ско-

рость протекания деградационных процессов). Высокое значение K_i означает, что более ответственные узлы, элементы станка с высокой скоростью деградационных процессов надо диагностировать чаще (интервал диагностирования будет меньше).

Вышеназванные коэффициенты определяются методом экспертных оценок. Приближенные значения коэффициентов приведены в матрице K . Столбцы в матрице расположены в порядке увеличения скорости деградационных процессов элементов (первый столбец соответствует медленной скорости деградации объекта диагностирования, третий столбец — высокой). Строки в матрице расположены в порядке увеличения коэффициента ответственности элементов (первая строка определяет объект диагностирования с минимальной степенью ответственности, третий столбец — максимальной):

$$K = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Например, $k_{11} = 0,1...0,3$; $k_{12} = 0,4...0,5$; $k_{13} = 0,6...0,8$; $k_{21} = 0,2...0,4$; $k_{22} = 0,5...0,6$; $k_{23} = 0,7...0,9$; $k_{31} = 0,4...0,5$; $k_{32} = 0,6...0,8$; $k_{33} = 0,9...1,0$.

В табл. 3 приведены критерии и интервалы диагностирования узлов и элементов станка с ЧПУ. Для расчета интервала диагностирования T_i было принято время цикла диагностирования $T_c = 1$ с.

В последнем столбце табл. 3 вычислены интервалы диагностирования, где T_{\min} — минимальный интервал диагностирования.

Вычисляется сумма интервалов диагностирования узлов и элементов станка с ЧПУ. В нашем примере сумма интервалов диагностирования равна $20,9 T_{\min}$. Затем вычисляется кратность интервалов диагностирования для i -го узла, элемента станка

Таблица 3

Критерии и интервалы диагностирования модулей, узлов и элементов станков с ЧПУ

№	Модуль, узел, элемент	K_{otv}	K_{degr}	K_i	T_i , с	kT_{\min}
1	Станины и направляющие	0,5	0,1	0,6	1,67	$1,5T_{\min}$
2	Шарико-винтовые передачи	0,4	0,2	0,6	1,67	$1,5T_{\min}$
3	Зубчатые передачи	0,2	0,3	0,5	2,00	$1,8T_{\min}$
4	Ременные передачи	0,2	0,3	0,5	2,00	$1,8T_{\min}$
5	Шпиндельные узлы	0,4	0,3	0,7	1,43	$1,3T_{\min}$
6	Подшипники	0,3	0,3	0,6	1,67	$1,5T_{\min}$
7	Резцедержка или устройства смены инструмента	0,2	0,2	0,4	2,50	$2,3T_{\min}$
8	Резущий инструмент	0,4	0,5	0,9	1,11	T_{\min}
9	Электрические двигатели	0,2	0,3	0,5	2,00	$1,8T_{\min}$
10	Системы управления приводами	0,2	0,2	0,4	2,50	$2,3T_{\min}$
11	Датчики	0,5	0,3	0,8	1,25	$1,1T_{\min}$
12	Задняя бабка	0,1	0,2	0,3	3,33	$3,0T_{\min}$

Таблица 4

Кратности интервалов диагностирования модулей, узлов и элементов станков с ЧПУ

№ модуля, узла, элемента	Модуль, узел, элемент	Кратность	Относительная кратность	Округленная кратность
1	Станины и направляющие	13,9	2,0	2
2	Шарико-винтовые передачи	13,9	2,0	2
3	Зубчатые передачи	11,6	1,7	2
4	Ременные передачи	11,6	1,7	2
5	Шпиндельные узлы	16,1	2,3	2
6	Подшипники	13,9	2,0	2
7	Резцедержка или устройства смены инструмента	9,1	1,3	1
8	Режущий инструмент	20,9	3,0	3
9	Электрические двигатели	11,6	1,7	2
10	Системы управления приводами	9,1	1,3	1
11	Датчики	19,0	2,7	3
12	Задняя бабка	7,0	1,0	1

путем деления суммы интервалов диагностирования на kT_{\min} . Находится минимальная кратность 7,0 для задней бабки (элемент, для которого требуется максимальный интервал диагностирования) и вычисляется относительная кратность — все значения делятся на минимальную кратность 7,0. Для практической реализации относительная кратность округляется до целых чисел. В табл. 4 приведены кратности интервалов диагностирования узлов и элементов станка с ЧПУ.

Таким образом, в рассмотренном примере за один цикл диагностирования необходимо диагностировать, например, станины и направляющие — два раза, режущий инструмент — три раза, заднюю

бабку — один раз. В качестве примера предлагается следующая последовательность диагностирования узлов и элементов станка с ЧПУ (указаны № узлов и элементов): 8, 11, 1, 2, 3, 4, 5, 8, 11, 6, 7, 9, 1, 2, 3, 8, 11, 4, 5, 6, 9, 10, 12.

Выводы. Рассмотрены вопросы построения систем диагностирования станков с ЧПУ. Разработан алгоритм построения систем диагностирования станков с ЧПУ с учетом степени ответственности узлов, элементов и скорости протекания деградационных процессов. Данный алгоритм отличается от существующих алгоритмов универсальностью, удобством построения систем диагностирования технологического оборудования, содержащих механическую, электрическую, электромеханическую, электронную подсистемы. Предложен критерий для вычисления интервалов диагностирования.

Работа выполнена при поддержке Аналитической ведомственной целевой программы "Развитие научного потенциала высшей школы" (2009—2011 годы) Министерства образования и науки Российской Федерации, проект № 2.1.2/2025 "Исследование и моделирование устройств диагностирования мехатронных систем".

Список литературы

1. Схиртладзе А. Г., Уколов М. С., Скворцов А. В. Надежность и диагностика технологических систем: учебник / Под ред. А. Г. Схиртладзе. М.: Новое знание, 2008. 518 с.
2. Синопальников В. А., Григорьев С. Н. Надежность и диагностика технологических систем: учебник. М.: Высш. шк., 2005. 343 с.
3. Никитин Ю. Р., Абрамов И. В. Диагностирование мехатронных систем // Механика и процессы управления. Тр. XXXIX Уральского семинара по механике и процессам управления, посвященного 85-летию со дня рождения академика В. П. Макеева. Екатеринбург : УрО РАН, 2009. С. 305—312.
4. Nikitin Y. R., Abramov I. V. CNC machines diagnostics // Proc. 13th International Symposium on Mechatronics. 2—4 June, 2010. Trencinske Teplice, Slovakia. P. 89—91.

ИНФОРМАЦИЯ

С 3 по 8 октября 2011 г. в пос. Дивноморское Геленджикского района в рамках

4-й Всероссийской мультikonференции по проблемам управления (МКПУ-2011)

состоится научно-техническая конференция

"Искусственный интеллект и управление" (ИИУ-2011)

Научные направления конференции:

- ◆ Интеллектуальный анализ данных
- ◆ Искусственный интеллект в управлении
- ◆ Системы принятия решений, планирования и моделирования
- ◆ Сетевые модели в искусственном интеллекте
- ◆ Компьютерная обработка естественно-языковых текстов и семантический поиск
- ◆ Автоматизация научных исследований и управление знаниями
- ◆ Обучающие и экспертные системы
- ◆ Прикладные интеллектуальные системы

Подробная информация о мультikonференции МКПУ-2011 и условиях участия в ней размещается на сайте: <http://www.mvs.tsure.ru>

УДК 681.518

С. Ю. Боровик, канд. техн. наук,
Институт проблем управления
сложными системами РАН, г. Самара
borovik@iccs.ru

Система измерения смещений торцов лопаток с распределенным кластером одновитковых вихретоковых датчиков*

Рассматриваются аппаратно-программные средства системы измерения координат смещений торцов лопаток газотурбинного двигателя с кластером одновитковых вихретоковых датчиков, распределенных по статору силовой установки. Приводится описание лабораторного стенда, анализируются полученные результаты экспериментов.

Ключевые слова: смещения торцов лопаток, лабораторный стенд, кластерные методы, распределенный кластер датчиков, система измерения, проверка работоспособности, анализ результатов

Введение

Известны методы получения информации о координатах смещений торцов лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) с помощью распределенных по статору кластеров высокотемпературных одновитковых вихретоковых датчиков (ОВТД) с чувствительными элементами (ЧЭ) в виде отрезка проводника [1, 2]. Однако до настоящего времени проверка работоспособности и эффективности разработанных методов в производственных условиях не проводилась. Связано это с тем, что в отечественном двигателестроении затормозилось, а на многих предприятиях практически остановилось создание новых ГТД, и, как следствие, прекратились стендовые и летные испытания новых изделий. В связи с этим оказалась невозможной существовавшая до последнего времени непрерывная экспериментальная проверка новых методов и реализующих их средств измерения в "огневых условиях" производственных испытаний (несмотря на актуальность и востребованность тематики, подтверждаемую отечественными специалистами, а также зарубежными пуб-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 08-08-00422а).

ликациями [3, 4]). Поэтому экспериментальная проверка рассматриваемых методов измерения и систем, реализующих эти методы, проводилась в лабораторных условиях на специально разработанном имитаторе объекта.

В статье приводится описание имитатора объекта, технических и программных средств системы измерения x , y -координат смещений торцов лопаток компрессора ГТД с помощью распределенного кластера из двух ОВТД, а также анализируются полученные в ходе лабораторных исследований результаты.

Имитатор объекта

Имитатор объекта состоит из двух основных узлов — имитатора статора и имитатора ротора (рис. 1, см. третью сторону обложки) [5].

Имитатор статора представляет собой сварную несущую конструкцию с основанием, выполненную из стальных уголков и обеспечивающую крепление высокотемпературных ОВТД в четырех точках (1, 2, 3, 4) с угловым шагом 90° ¹. При этом каждая точка оборудована механизмом смещений ЧЭ датчиков в радиальном направлении, контролируемым индикаторами часового типа (I_1 , I_2 , I_3 , I_4) промышленного изготовления с разрешающей способностью 0,01 мм.

Имитатор ротора — колесо с лопаточным венцом (элемент конструкции реального компрессора ГТД) и электропривод (двигатель постоянного тока с регулируемой скоростью вращения). С помощью специального механизма обеспечивается осевое смещение колеса, а следовательно, — торцов лопаток относительно ЧЭ ОВТД. При этом осевые смещения одинаковы во всех четырех точках крепления ОВТД, и они контролируются дополнительным индикатором (I_0).

Для получения информации о двух координатах смещений (осевом и радиальном) в точке контроля I размещен распределенный кластер из двух датчиков — ОВТД₁₁ и ОВТД₁₂ (датчики с механизмом радиальных перемещений и индикатором представлены на рис. 2). Перемещение датчиков в радиальном направлении осуществляется с помощью винта, который вызывает прогиб упругого элемента в виде

¹ Размещение дополнительных ОВТД в точках 2, 3, 4 используется при оценке работоспособности методов измерения деформаций статора, описание которых приведено в [6, 7].

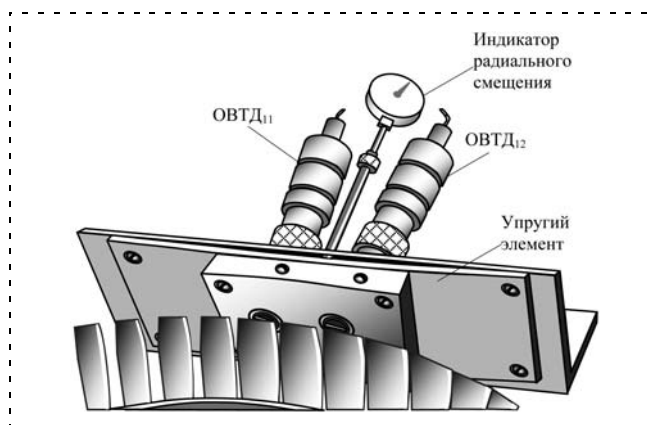


Рис. 2. Крепеж распределенного кластера ОВТД

плоской пластины, закрепленной по торцам на уголке несущей конструкции имитатора статора. При этом прогиб упругого элемента увеличивается, рабочий зазор ($PЗ$) между ЧЭ и торцами лопаток уменьшается. При вращении винта в обратном направлении под действием упругой силы кластер датчиков и его ЧЭ возвращаются в исходное состояние.

Питание электродвигателя осуществляется от сети через лабораторный автотрансформатор с выпрямителем. Напряжением на выходе трансформатора регулируется скорость вращения лопаточного колеса.

Изменениями положения лопаточного колеса в осевом направлении и положения ЧЭ ОВТД₁₁ и ОВТД₁₂ при соответствующем контроле (I_0 , I_1) обеспечивается проверка работоспособности метода и средств получения информации о x , y -координатах смещений торцов лопаток с помощью распределенного кластера ОВТД.

Технические и программные средства системы

Упрощенная структурная схема технических средств системы измерения x , y -координат смещений торцов лопаток ГТД представлена на рис. 3. Схема содержит два высокотемпературных датчика типа ОВТД-К-3(Л) [8] (ОВТД₁₁, ОВТД₁₂), встроенный в линию связи преобразователь индуктивностей ОВТД в напряжение (Пр), датчик частоты вращения (ДЧВ) с формирователем Φ , выносной модуль L-Card (E14-440) для ввода аналоговых и дискретных сигналов с датчиков [9, 10], а также ПЭВМ.

Преобразователь сигналов ОВТД миниатюризирован. В смежные плечи мостовой измерительной цепи преобразователя включаются ОВТД₁₁ и ОВТД₁₂, которые, в соответствии с реализуемым методом измерения,

поочередно выполняют рабочие и компенсационные функции [2]. Выходные сигналы преобразователя подаются на аналоговый вход (АВх) модуля E14-440. Преобразователь работает с частотой импульсного питания порядка 154 кГц (длительность импульса 0,3 мкс), причем импульсы питания обеспечивают синхронный запуск устройств в составе модуля E14-440.

Сигналы ДЧВ после формирования (в формирователе Φ) поступают на дискретный вход (ДВх) модуля E14-440.

Модуль E 14-440 обеспечивает аналого-цифровое преобразование сигналов ОВТД, а также преобразования в код периодов импульсов с ДЧВ, которые соответствуют скорости вращения лопаточного колеса имитатора. При этом управление перечисленными операциями и первичная обработка полученной с датчиков информации проводится с помощью встроенного в плату сигнального процессора [9, 10].

Структура программного обеспечения (ПО) представлена на рис. 4. В его состав входят стандартный драйвер платы E14-440 для Windows 95/98/NT/2000, программы управления сигнальным процессором (BIOS), расчета физических значений x , y -координат смещений торцов лопаток колеса ротора ($PЗ$ и осевых смещений), вычисления скорости вращения колеса, визуализации и накопления полученных результатов в базе данных (БД) эксперимента.

Управляющая программа сигнального процессора работает по принципу команд. Командный монитор анализирует поступающие из ПЭВМ команды и запускает те или иные подпрограммы, а также обеспечивает задание исходных данных для организации процесса сбора измерительной информации (массива логических номеров каналов, частоты опроса АЦП и ряда других параметров). С помощью логического номера канала задаются параметры сбора — физический номер канала, тип подключения входных каскадов и коэффициент усиления.

Сигнальный процессор модуля E14-440 работает в режиме внешней синхронизации от преобразователя сигналов ОВТД. Запуск АЦП осуществляется по команде, формируемой в ПЭВМ, а коды реги-

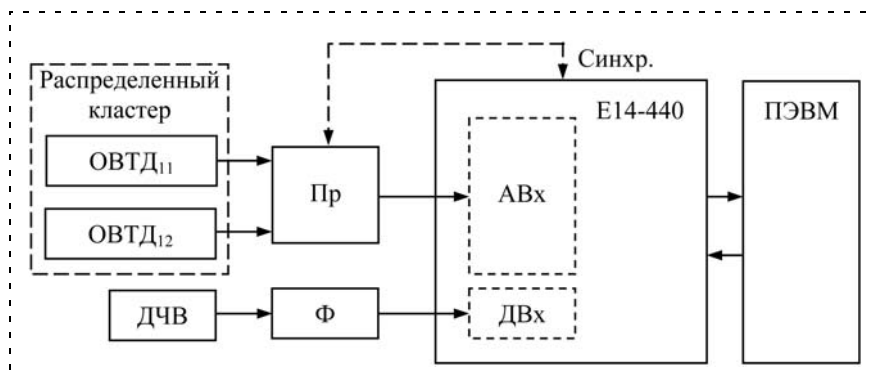


Рис. 3. Структура технических средств

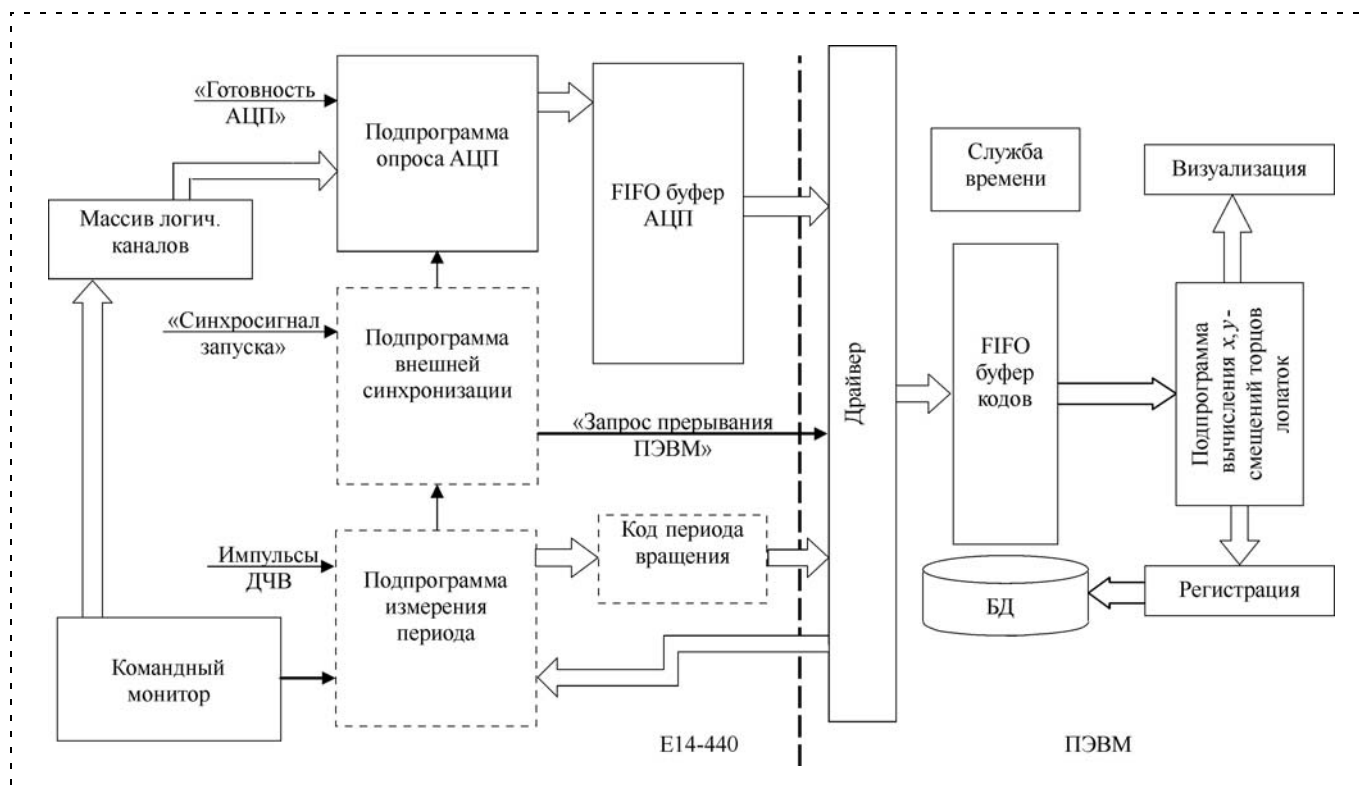


Рис. 4. Структура программного обеспечения

стрируются в кольцевом FIFO-буфере внутренней памяти сигнального процессора, при этом АЦП работает в режиме непрерывного преобразования в код индуктивностей ОВТД. Это позволило максимально использовать стандартные функции фирменного ПО (BIOS) модуля E14-440, добавив в его состав лишь подпрограмму измерения периода вращения колеса ротора.

Подпрограмма измерения периода запускается одновременно с запуском АЦП. Ее инициализация осуществляется сигналом "Импульс ДЧВ", который поступает на ДВх модуля. С помощью встроенного в сигнальный процессор таймера осуществляется измерение временного интервала между сигналами с ДВх, соответствующего периоду вращения колеса. С приходом очередного сигнала на ДВх в массив с кодами канала ОВТД вместо очередных двух отсчетов записывается флаг начала нового оборота и рассчитанный период вращения колеса. Далее запись кодов канала ОВТД происходит в обычном режиме.

При заполнении внутреннего FIFO-буфера сигнального процессора генерируется прерывание, драйвер модуля считывает данные и помещает их в FIFO-буфер в памяти ПЭВМ. Завершение формирования буфера в памяти ПЭВМ происходит по его заполнению (обычно размер буфера выбирается таким образом, чтобы при минимальных измеряемых скоростях вращения число отсчетов в буфере соответствовало полному периоду вращения колеса)

либо по превышению некоторого интервала времени TimeOut.

В сформированном в памяти ПЭВМ буфере с кодами определяются границы, соответствующие одному периоду вращения колеса имитатора. В пределах этих границ считывается значение периода вращения колеса и формируется массив с кодами для измерительного канала ОВТД, который может быть подвергнут обработке, устраняющей разброс, вызванный влиянием помех.

Далее осуществляется расчет моментов времени, соответствующих прохождению замками лопаток так называемых виртуальных геометрических центров (ВГЦ) [2] распределенного кластера ОВТД. По результатам расчетов формируются массивы выборок, при этом число элементов в выборках соответствует числу, а их расположение — порядковым номерам лопаток колеса имитатора. Вычисление физических значений x , y -координат для всех лопаток колеса осуществляется на основе снятых экспериментально градуировочных характеристик измерительных каналов ОВТД в соответствии с алгоритмом, описание которого приведено в [11].

Периодичность опроса измерительных каналов, а также всех последующих вычислений задается пользователем на этапе конфигурирования и обычно составляет одну секунду. Управление запуском всех подпрограмм, представленных на схеме рис. 4, осуществляет служба времени, которая использует прерывание от системного таймера ПЭВМ.

Результаты экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования призваны подтвердить работоспособность и эффективность метода измерения координат смещений торцов лопаток с помощью распределенного кластера ОВТД, а также реализующих указанный метод средств, причем работоспособность рассматривается, в первую очередь, как метрологическая состоятельность измерительных каналов с распределенным кластером ОВТД, оценка которой осуществляется по результатам исследований, проводимых на имитаторе объекта в статических условиях.

Кроме того, приводятся данные о РЗ (y) и осевых смещениях (x) торцов лопаток, полученные в динамике, т. е. в процессе вращения лопаточного колеса. При этом имитатор рассматривается как объект с неизвестными параметрами, а для подтверждения работоспособности и эффективности макетов полученные результаты сравниваются (сопоставляются) с теми, что найдены в статике.

Метрологические исследования в каналах ОВТД в составе распределенного кластера сводятся к получению семейств градуировочных характеристик (ГХ) в виде зависимостей кодов от координат смещения торцов лопаток колеса имитатора с последующей оценкой систематической и случайной составляющих погрешностей, а также алгоритмических погрешностей вычисления x , y -координат. Получению семейств ГХ предшествуют эксперименты по определению положения торца лопатки (например, № 1) в ВГЦ в зонах чувствительности обоих датчиков. С этой целью снимается зависимость кода C , соответствующего выходному напряжению преобразователя от координаты z (при этом перемещение

торца выбранной лопатки осуществляется с помощью специального механизма и контролируется дополнительным индикатором, которые на рис. 1 не показаны).

Зависимость $C(z)$ представлена на рис. 5. Согласно полученным данным минимум кода (C_{\min}) соответствует прохождению торцом выбранной лопатки (№ 1) ЧЭ ОВТД₁₁, а максимум кода (C_{\max}) — ЧЭ ОВТД₁₂ (выполняющих функции рабочих). Координаты минимума $z_{\min} = 2,88$ мм, а максимума — $z_{\max} = 36,54$ мм. Далее определяется координата z , соответствующая ВГЦ в точке O (z_0). Ее поиск ведется при $z > z_{\min}$ на участке функции $C(z)$ справа от ее минимума и поблизости от него, где чувствительность к координате z (а следовательно, и к координате x) максимальна (рис. 5). ВГЦ в точке O' соответствует координате $z_{O'}$, но ее поиск ведется при $z < z_{\max}$ на участке $C(z)$ слева от ее максимума и поблизости от него, где чувствительность к координатам z и x также максимальна. Найденные значения z_0 и $z_{O'}$ составляют 4,12 и 35,3 мм соответственно (рис. 5).

В положениях $z_0 = 4,12$ мм и $z_{O'} = 35,30$ мм лопатка фиксируется, а затем изменениями положения лопаточного колеса по оси X (при контроле индикатором I_0), а также положения кластера датчиков по оси Y (при контроле индикатором I_1) поочередно снимаются характеристики $C_{11}(x, y)$ и $C_{12}(x, y)$. Результаты эксперимента представлены на рис. 6.

Систематическая составляющая основной погрешности определяется погрешностью кусочно-линейной аппроксимации функции двух переменных (x, y). Ее максимальное значение не превышает 1 % в диапазонах изменений x -координаты $-2...2$ мм

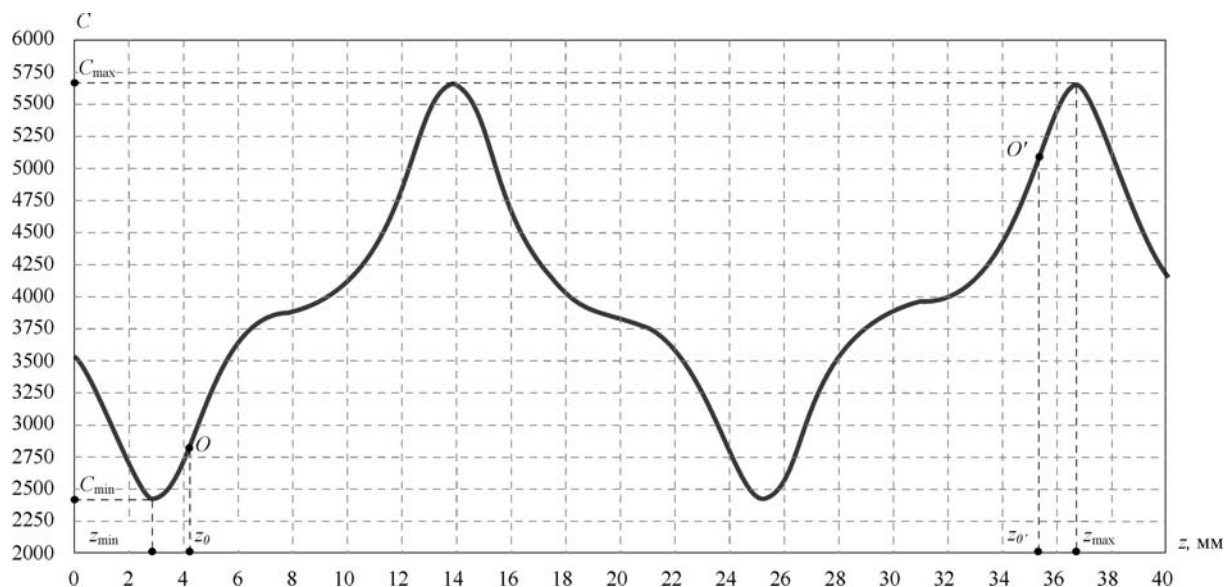


Рис. 5. Зависимость $C(z)$ (распределенный кластер ОВТД₁₁ и ОВТД₁₂)

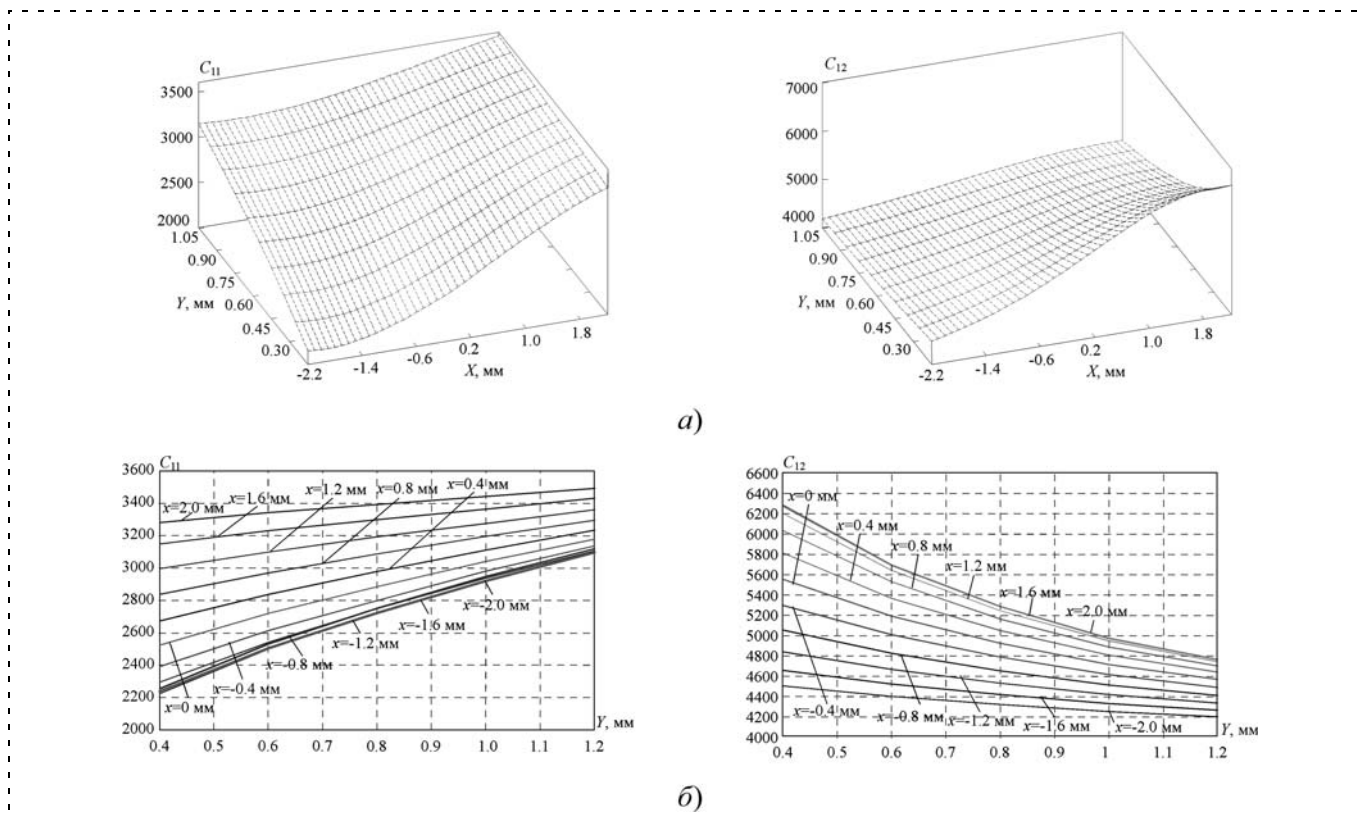


Рис. 6. Семейства GX в каналах распределенного кластера ОВТД: $C_{11}(x, y)$ и $C_{12}(x, y)$ (а), $C_{11}(y)$ и $C_{12}(y)$ при $x = \text{const}$ (б)

и y -координаты 0...1,1 мм [11]. Случайная составляющая оценивается по СКО и составляет 1,6 ед. кода (0,13 и 0,08 % для каналов ОВТД₁₁ и ОВТД₁₂ соответственно). Алгоритмическая погрешность вычисления координат не превышает 0,5 % [11].

Далее описываются эксперименты, в которых лопаточное колесо приводится во вращение электроприводом, и информация поступает с измерительных каналов системы. С помощью распределенного кластера ОВТД₁₁ и ОВТД₁₂ исследуются x , y -координаты смещений торцов лопаток, причем в процессе вращения лопаточного колеса ожидаются биения в направлении оси X , а также колебания координаты y (РЗ), связанные с пластической вытяжкой лопаток.

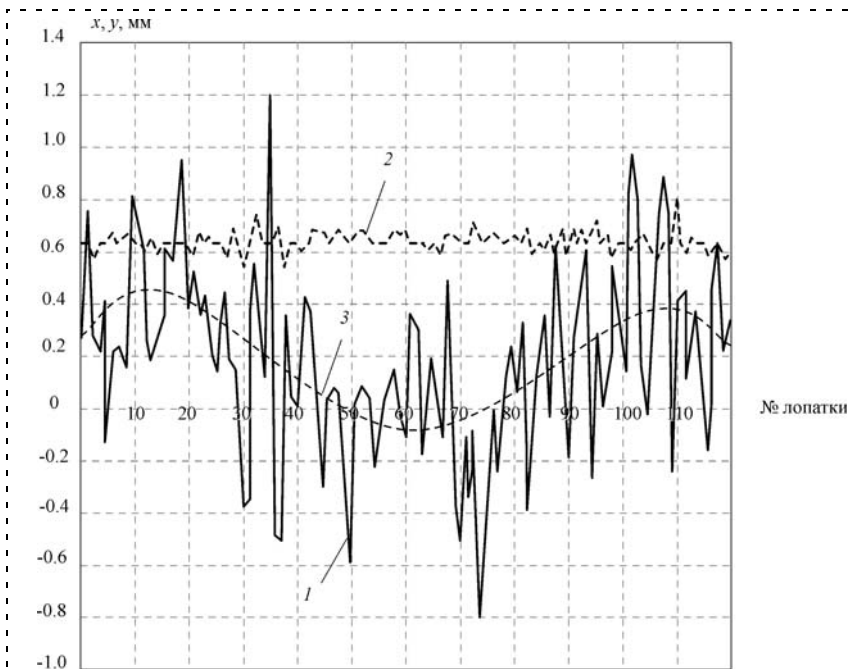


Рис. 7. Зависимость x , y -координат от номера лопатки

Эксперименты выполняются в динамическом режиме — в процессе вращения лопаточного колеса с частотой 400 мин⁻¹ (осевое положение колеса, установленное с помощью индикатора I_0 (см. рис. 1), — $x = 0$ и радиальное смещение, установленное с помощью индикатора I_1 , — $y = 0,6$ мм).

На рис. 7 представлены результаты измерений x и y -координат (графики 1 и 2, соответственно) в зависимости от номера лопатки. Там же с помощью встроенных функций аппроксимации и сглаживания программы Microsoft Excel построена "линия тренда" (3) для графика 2.

Из графиков видно, что координата y (P3) за полный оборот колеса изменяется в незначительных пределах от лопатки к лопатке. Среднее по всем лопаткам значение P3 составило 0,65 мм, а отклонения P3 по лопаткам не превысили 0,15 мм. В свою очередь, биения лопаточного колеса в направлении оси X составляют 0,45 мм, что соответствует оценкам биений, полученным с помощью сосредоточенного кластера ОВТД и в статическом режиме при ручной прокрутке колеса [5].

Таким образом, реализованный в системе метод измерения двухкоординатных смещений торцов лопаток с помощью распределенного кластера ОВТД не только обеспечил получение достоверной информации о P3 и осевых смещениях торцов лопаток, но и позволил оценить осевые биения исследуемого колеса.

Заключение

Разработана система, в которой реализован метод измерения координат смещения торцов лопаток с помощью распределенного кластера ОВТД. Экспериментальные исследования погрешностей измерительных каналов подтвердили их метрологическую состоятельность. Результаты измерений радиальных и осевых смещений торцов лопаток, полученные в процессе вращения лопаточного колеса имитатора объекта, показали работоспособность и эффективность указанного метода и реализующих его средств.

Список литературы

1. Беленький Л. Б., Боровик С. Ю., Логвинов А. В., Райков Б. К., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П., Тулупова В. В. Методы измерения смещений торцов лопаток в компрессорах и турбинах на основе распределенных кластеров датчиков. Часть 1.

Обоснование предлагаемых методов и их описание // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 4. С. 16—19.

2. Беленький Л. Б., Боровик С. Ю., Логвинов А. В., Райков Б. К., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П., Тулупова В. В. Уменьшение длительности получения информации о смещениях торцов лопаток // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 5. С. 53—59.

3. Lattime S., Steinetz B., Robbie M. Test Rig for Evaluating Active Turbine Blade Tip Clearance Control Concepts // 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Huntsville, Alabama, July 20—23, 2003.

4. Simon D., Gang S., Hunter G., Ten-Huei Guo, Semega K. Sensor Needs for Control and Health Management of Intelligent Aircraft Engines // ASME Turbo Expo 2004, Vienna, Austria, 14—17 June, 2004.

5. Белослудцев В. А., Боровик С. Ю., Кутейникова М. М., Райков Б. К., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П., Тулупова В. В. Экспериментальная проверка работоспособности кластерных методов измерения координат смещения торцов лопаток и деформаций статора в лабораторных условиях // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XII Междунар. конф. Самара, 2010. С. 316—322.

6. Боровик С. Ю., Райков Б. К., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. Метод получения информации о деформациях статорной обложки винтовентилятора, радиальных зазорах, смещениях ее геометрического центра и оси винта // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Тр. X Междунар. конф. Самара, 2008. С. 290—291.

7. Боровик С. Ю., Райков Б. К., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. Метод получения информации о деформациях статора, радиальных зазорах, смещениях его центра и биениях ротора // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Тр. X Междунар. конф. Самара, 2008. С. 298—304.

8. Методы и средства измерений многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок / Под ред. Секисова Ю. Н., Скобелева О. П. Самара: Самарский научный центр РАН, 2001. 188 с.

9. Модуль E-440. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. М.: ЗАО "Л-Кард", 2003. 91 с.

10. Внешние модули АЦП/ЦАП | E14-440 URL: <http://www.lcard.ru/products/external/e-440>.

11. Кутейникова М. М., Секисов Ю. Н. Алгоритм вычисления радиальных и осевых смещений торцов лопаток // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Тр. XII Междунар. конф. Самара, 2010. С. 323—327.

ИНФОРМАЦИЯ

S2011
Sibcon

15—16 сентября 2011 года в г. Красноярске состоится

9-я МЕЖДУНАРОДНАЯ IEEE-СИБИРСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО УПРАВЛЕНИЮ И СВЯЗИ — 2011

Председатель конференции - проф. Г. С. Патрин, Сибирский федеральный университет

Тематика конференции:

- Фундаментальные проблемы теории управления и связи.
- Радиолокация, радионавигация и распространение радиоволн.
- Нанотехнологии, полупроводниковые материалы, сенсоры и электронные приборы.
- Нейрокибернетика, биофизика и медицинская электроника.
- Радиофизика и оптика.

Контактная информация:

В. С. Панько, Сибирский федеральный университет,
оф. Б-408, ул. Киренского, 28, Красноярск, 660074, Россия
Тел.: (391)-2912278

Эл. почта: sibcon@sfu-kras.ru

Сайт конференции: <http://chapters.comsoc.org/tomsk/sibcon/index.htm>

Я. С. Коровин, канд. техн. наук, зав. лаб.,
М. В. Хисамутдинов, программист,
 Научно-исследовательский институт
 многопроцессорных вычислительных систем
 имени академика А. В. Каляева
 Южного федерального университета, г. Таганрог
 korovin@mvs.sfedu.ru

Фильтрация изображений в целях выделения эллипсов в системе бесконтактного определения разновысотности тепловыделяющих сборок активной зоны реактора типа ВВЭР-1000¹

Рассматривается новый метод поиска эллипсов на изображении, в котором применены этапы цифровой обработки изображения, медианное сложение, преобразование Хафа и генетические алгоритмы. Данный метод прошел апробацию в системе бесконтактного определения разновысотности тепловыделяющих сборок активной зоны атомного реактора типа ВВЭР-1000 энергоблока 1 Волгодонской АЭС [1] (ОАО Концерн "Росэнергоатом").

Ключевые слова: активная зона, тепловыделяющая сборка, телевизионная камера, медианное сложение, преобразование Хафа, генетические алгоритмы, мутация, кроссинговер, автоматизация технологических процессов

Введение. В данной статье рассмотрен метод поиска эллипсов на изображении. Метод используется в системе бесконтактного определения разновысотности тепловыделяющих сборок (ТВС) — далее изделий — активной зоны атомного реактора типа ВВЭР-1000 [1, 2]. Система исключает механический контакт с изделиями, повышает безопасность контроля разновысотности ТВС. Исходными данными являются снимки, а также данные о положении камеры, полученные с терминала оператора. В процессе обработки полученные снимки проходят несколько алгоритмов фильтрации изображения, в итоге по полученным данным вычисляются координаты высоты видимых изделий [1].

Предлагаемый метод поиска эллипсов на изображении состоит из двух основных этапов:

- этапа улучшения качества входного изображения;
- этапа построения пространства Хафа [3, 4] и поиска локальных минимумов с использованием генетических алгоритмов для детектирования эллипсов на изображении.

Рассмотрим данные этапы подробнее.

Улучшение качества изображения. Изображения изделий, получаемые с камеры машины перегру-



Рис. 1. Сложение множества кадров, улучшение показателя сигнал/шум

зочной [1, 2], имеют высокий уровень шума. Для улучшения показателя сигнал/шум применяется сложение серии снимков.

На рис. 1 слева представлен одиночный кадр, полученный камерой телевизионной системы "Диаконт", справа представлен фрагмент кадра, полученного медианным сложением [5] 15 одиночных кадров.

Поиск эллипсов на изображении. В методе поиска эллипсов, предложенном в [2], используется алгоритм, основанный на выделении границ методом Кэнни. После выделения границ проводится дальнейшая фильтрация изображения в целях выделения элементов кривых, принадлежащих окружностям. На завершающем этапе кривые объединяются в группы и выполняется операция вписывания эллипсов.

Данный подход имеет ряд недостатков: из-за зашумленности изображения либо из-за несовершенства алгоритма детектирования границ могут появиться "потерянные" точки на кривой, а также небольшие отклонения от идеальной формы эллипса. По этим причинам часто довольно сложно сгруппировать выделенные границы в соответствующий набор эллипсов. Назначение преобразования Хафа состоит в том, чтобы разрешить проблему группировки граничных точек путем применения определенной процедуры голосования к набору параметризованных объектов изображения [4]. Для поиска эллипсов на изображении в данной работе применяются модифицированные обобщенные преобразования Хафа [3].

Рассмотрим преобразование Хафа для простейшего случая — нахождения прямых на изображении. Пусть дано входное растровое изображение (рис. 2).

Запишем уравнение прямой в нормальном виде:

$$x \cos \theta + y \sin \theta - \rho = 0, \quad (1)$$

где ρ — длина перпендикуляра, опущенного из начала координат на прямую, а θ — угол между поло-

¹ Исследования поддержаны грантом РФФИ № 10-08-01290-а.

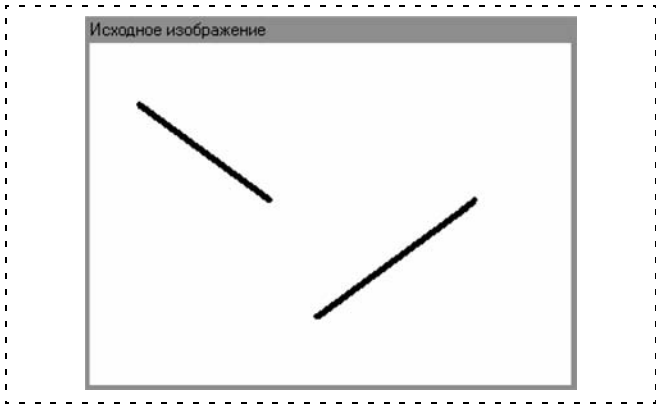


Рис. 2. Входное растровое изображение

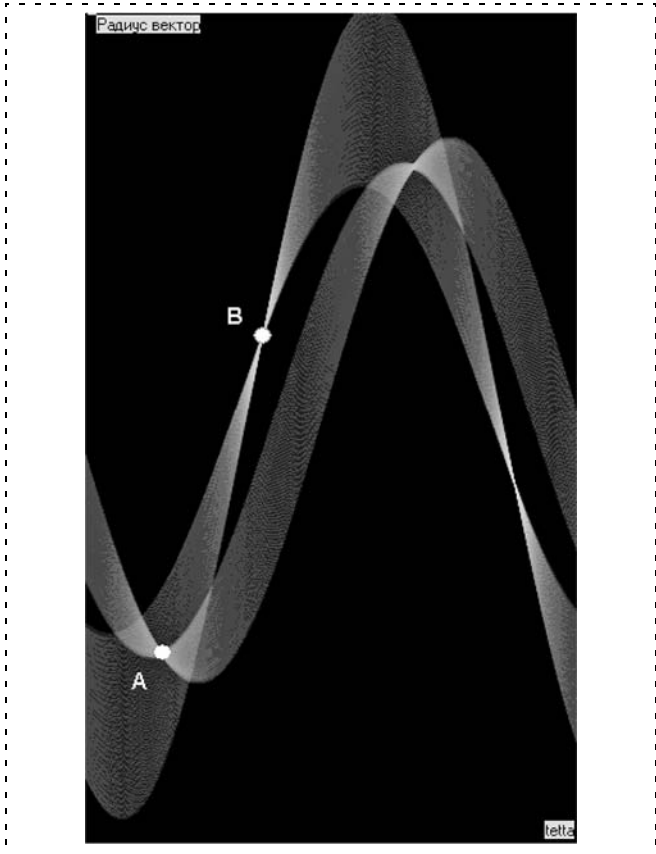


Рис. 3. Визуализация пространства Хафа

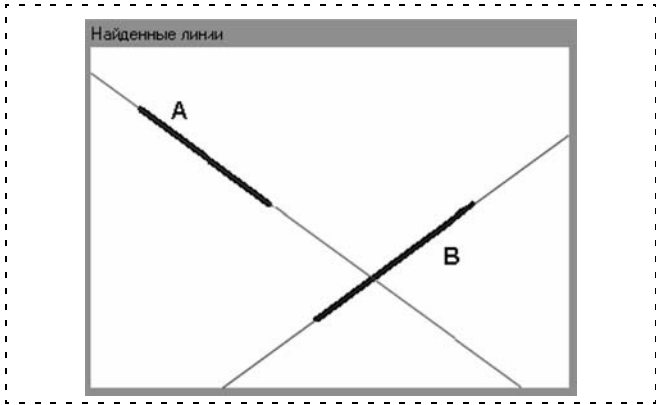


Рис. 4. Найденные прямые на изображении

жительным направлением оси абсцисс и направлением перпендикуляр.

Далее строится пространство Хафа. Оно представляет собой n -мерный массив; в нашем случае для нахождения прямых достаточно массива размерности $n = 2$. Изначально массив заполняется нулями. На первом этапе выбираются все точки на исходном изображении (рис. 2), имеющие резкие границы с соседними пикселями, полученные координаты точек подставляются в (1) для всех возможных значений $\theta = [0, 360]$. Для каждой пары $\langle \rho, \theta \rangle$ значе-

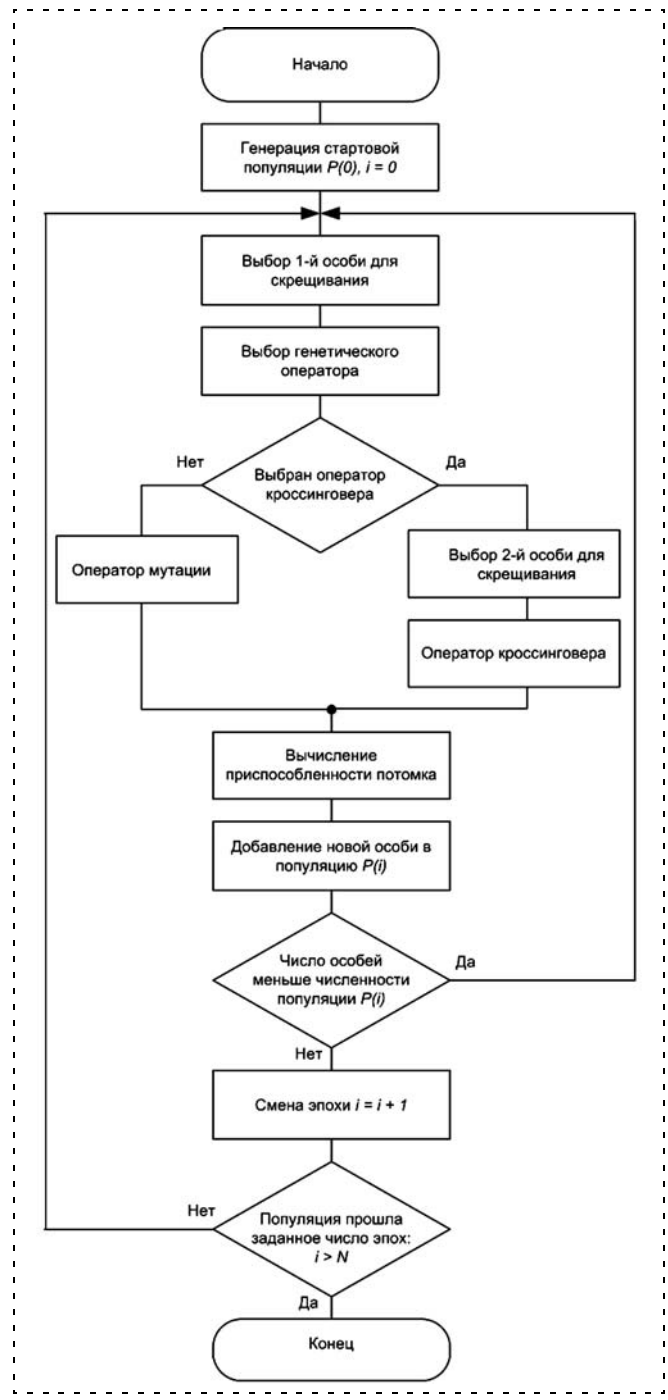


Рис. 5. Структурная схема предлагаемого генетического алгоритма

ние в массиве наращивается на 1. На втором этапе в полученном массиве определяются локальные оптимумы, значения $\langle \rho, \theta \rangle$ локальных оптимумов (рис. 3) будут соответствовать искомым прямым на изображении (рис. 4).

Для поиска прямых на изображении подбор одного параметра допустим методом перебора, однако в задаче поиска эллипсов необходимо перебирать четыре параметра — два радиуса, наклон эллипса, а также угол поворота радиус-вектора. Данный перебор требует значительных временных затрат, поэтому в данной работе предлагается использовать генетический алгоритм [5] для ускорения работы метода нахождения эллипсов на изображении.

Рассмотрим структуру предлагаемого генетического алгоритма (рис. 5).

На первом этапе создается начальная популяция особей, значения генов хромосом выбираются равномерно из диапазона допустимых значений для заданного гена.

$$H1 = \{a \ b \ c \mid d\}$$

$$H2 = \{e \ f \ g \mid h\}$$

$$H = \{a \ b \ c \mid h\}$$

Рис. 6. Реализация оператора кроссинговера



Рис. 7. Входное изображение для детектирования эллипсов

Затем алгоритм проходит N эпох, в результате которых отбираются хромосомы, являющиеся наиболее близкими к локальным оптимумам в пространстве Хафа.

В каждой эпохе над хромосомами выполняются генетические операторы кроссинговера и мутации. В качестве оператора кроссинговера используется точечный кроссинговер (рис. 6).

При точечном кроссинговере выбирается точка сочленения генов, в примере (рис. 6) выбран третий локус хромосомы. При выполнении оператора потомок H получает гены родителя $H1 - \{a, b, c\}$ и гены родителя $H2 - \{h\}$.

Оператор мутации реализован следующим образом: каждый ген хромосомы с определенной вероятностью принимает случайное значение из множества допустимых значений.

На рис. 7 представлено входное изображение, а на рис. 8 (см. третью сторону обложки) — изображение с эллипсами, найденными с помощью модифицированных обобщенных преобразований Хафа.

Заключение. В статье рассмотрен новый метод поиска эллипсов на изображении, который применяется в системе бесконтактного определения разности высотности ТВС активной зоны атомного реактора типа ВВЭР-1000. Разработан модифицированный алгоритм построения пространства Хафа и поиска локальных оптимумов в нем на основе генетических алгоритмов. В результате получена требуемая точность определения центров эллипсов на изображении за приемлемое время. Программное моделирование разработанного метода подтвердило его правильность и эффективность применения в реальных производственных условиях.

Список литературы

1. Каляев И. А., Коробкин В. В., Кухаренко А. П., Макеев В. В., Поваров В. П., Румянцев К. Е. Инновационные разработки Южного научного центра РАН в области создания систем управления для атомной энергетики // Инновации. 10(97). Ноябрь 2006. С. 65—68.
2. Балабаев С. Л., Румянцев К. Е., Радецкий В. Г., Коробкин В. В. Методы бесконтактного определения разности высотности головок ТВС и их описание: Отчет "Разработка и внедрение системы бесконтактного определения разности высотности головок ТВС в активной зоне реактора энергоблока 1 Волгодонской АЭС". Таганрог: ТРТУ, 2006. 102 с.
3. Tsuji S., Matsumoto F. Detection of Ellipses by a Modified Hough Transformation IEEE Transactions on Computers, 1978.
4. Материалы из свободной Интернет энциклопедии. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Преобразование_Хафа
5. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2006. 1073 с.
6. Материалы из свободной Интернет энциклопедии. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Генетический_алгоритм.

УДК 004.413.4; 519.252

А. Е. Колоденкова,
канд. техн. наук, доц., зам. зав. кафедрой,
Уфимский государственный
авиационный технический университет
anna82_42@mail.ru

Нечетко-множественный подход к оценке реалистичности альтернатив программного обеспечения мехатронных систем

Обсуждаются актуальные проблемы анализа реалистичности программного обеспечения (ПО) мехатронных систем (МС). Обобщены и систематизированы различные точки зрения на проблему реалистичности программных проектов в условиях неопределенности. Рассмотрен нечетко-множественный подход к комплексной многокритериальной оценке реалистичности ПО МС на основе формирования и выбора приемлемых проектных альтернатив.

Ключевые слова: реалистичность разработки проекта, оценка реалистичности проектных альтернатив, формирование и выбор приемлемой проектной альтернативы, многокритериальность, нечетко-множественный подход

"Ноу-хау технократов — уникальное программное обеспечение робототехнических систем"

В последнее время среди пяти ключевых направлений модернизации российской экономики выделяются стратегические информационные технологии, базирующиеся на создании суперкомпьютеров и разработке программного обеспечения (ПО) [1]. Вместе с тем, согласно существующим прогнозам, в ближайшем будущем революционизирующее влияние на развитие техносферы наряду с Nano-Bio-Info-Cogno (NBIC)-технологиями окажет мехатроника [2] — область науки и техники, связанная с разработкой, созданием и использованием мехатронных систем (МС), объединяющих механические, электронные и программно-вычислительные компоненты для компьютерного управления техническими объектами и технологическими процессами. Так, в ряде прогнозов развития России представлена так называемая технократическая модель "Россия 2020", в основу которой положена революционная программа робототехнической модернизации России под лозунгом, вынесенным в название данного раздела.

Отличительным признаком МС, построенных на базе универсальных вычислительных средств, является наличие соответствующего ПО [3], особенностями которого являются:

- сложность предметной области и архитектурная сложность;
- широкие функциональные возможности;
- высокие требования к ресурсам компьютера;
- максимально простой и понятный пользовательский интерфейс;
- возможность обновления и подключения дополнительных модулей;
- высокая надежность и производительность.

От организации, состава и уровня ПО МС зависит эффективность системы и ее дальнейшее использование [4].

Развитие современных МС характеризуется повышением сложности входящего в их состав ПО. Здесь речь идет о сложном, наукоемком и дорогостоящем программном средстве в виде крупномасштабного комплекса взаимосвязанных программ для решения задач управления и обработки информации, разрабатываемых на основе промышленной технологии с применением современных методов и средств программирования. Сложность ПО современных МС настолько велика, что стоимость и трудоемкость его разработки соизмерима, а часто в несколько раз превышает стоимость и трудоемкость разработки аппаратной части системы.

Примером зарубежного сложного ПО МС являются программные продукты компании Gostai, специализирующейся на разработке ПО для робототехнических систем — это уникальное ПО мобильных роботов Jazz в виде передвижных станций, обеспечивающее проведение телеконференций, рекламных акций, видеонаблюдения и исследований. Здесь же можно указать на программные продукты компании FANUC Ltd (Factory Automation Numerical Control), являющейся мировым лидером в области технологий ЧПУ, промышленной автоматизации и робототехники — это широкий ассортимент уникального ПО роботов всевозможного применения: "ArcTool" для дуговой сварки, "DispenseTool" для выполнения операций по склеиванию и спаиванию, "HandlingTool" для сборочных операций и съема материала, "PaintTool" для покрасочных и лакировочных работ и др. Можно привести также пример программного продукта "SCADA-пакет PcVue" ведущей европейской компании в области промыш-

ленных информационных технологий ARC Informatique для МС контроля и управления в промышленных процессах, энергоносителях и инфраструктуре.

Среди отечественных примеров сложного ПО МС можно указать на программные продукты ОАО "Корпорация "Русские системы" (ПО уникальных образцов бортовых и наземных МС специального назначения), а также Центра программных разработок компании "РТСофт" (ПО для встроенных МС в электроэнергетике, в металлургической, нефтегазовой и атомной промышленности, а также на транспорте).

Современная индустрия разработки ПО является развитой отраслью проектной деятельности, связанной со значительными затратами материальных, трудовых и финансовых ресурсов в условиях риска, обусловленного неопределенностью факторов внутренней и внешней среды проекта. Последние могут привести либо к ухудшению основных качественных показателей разрабатываемого ПО, либо к превышению бюджетного ассигнования и/или нарушению сроков осуществления проекта, либо просто к его провалу. В связи с этим на начальных этапах разработки ПО важная роль отводится анализу его реалистичности, направленному на недопущение провала его разработки и снижение рисков, а также на прогнозирование его стоимости, сроков и качества разработки [5–7].

В данной статье рассматривается нечетко-множественный подход к анализу реалистичности разрабатываемого ПО МС на основе формирования и выбора его приемлемых альтернатив в условиях неопределенности.

Проблемы оценки реалистичности разработки программных проектов в условиях неопределенности

Проект по разработке ПО далее будем именовать просто программным проектом (ПП). Очевидно, что успешность ПП по стоимости, срокам и качеству, а также возможные риски можно спрогнозировать уже на начальных стадиях его жизненного цикла. Однако такой прогноз существенно услож-

няется наличием проблемной *триады концептуального проектирования* ПО, представленной на рис. 1.

Здесь *концептуальное* (или *эскизное*) проектирование ПО представляет собой процесс разработки концептуальной модели ПП (цели, функциональные требования и бизнес-модель проекта), основными компонентами которой являются:

- ◀ *команда разработчиков (исполнителей)* ПО — это группа сотрудников, непосредственно работающих над осуществлением ПП;
- ◀ *программные средства разработки* ПО — это инструментальные средства, именуемые CASE (Computer Aided Software Engineering)-средствами, обеспечивающие автоматизацию процессов управления ПП в соответствии со стандартами, их интеграцию с программными средствами, предназначенными для поддержки проектного документооборота, анализа проектных рисков, организации бухгалтерского и управленческого учета и т. д.;
- ◀ *методы и технологии оценки реалистичности разработки* ПО — это методы и технологии, позволяющие по тем или иным критериям оценивать каждый альтернативный вариант разработки ПП.

Результаты концептуального проектирования ПО являются источником информации для этапа его материального (технического) проектирования.

Укажем на некоторые особенности элементов проблемной триады концептуального проектирования ПО.

Проблемы организации деятельности команды разработчиков ПО обусловлены, прежде всего, нехваткой или высокой занятостью разработчиков требуемой квалификации. Уже на стадии концептуального проектирования ПО необходимо четко структурировать все работы, определить численность, квалификацию и обязанности разработчиков, что позволит заказчику оценить реальную потребность в человеческих ресурсах и снизить риск затягивания сроков выполнения проектных работ. По мнению ведущего специалиста компании Construx Software Builders Inc Макконнелла (S. McConnell), "даже при наличии квалифицированных, мотивированных и трудолюбивых людей неверная структура команды способна свести на нет их усилия, вместо того чтобы привести их к успеху. Слабая структура команды может послужить причиной увеличения времени разработки, ухудшения качества, понижения морального духа, повышения текучести кадров и, в конечном итоге, привести к провалу проекта".

Проблемы выбора программных средств разработки ПО, т. е. CASE-средств, обусловлены наличием широкого их спектра. Из получивших определенное признание можно указать такие технологии проектирования ПО, как Capability Maturity Model (CMM), Microsoft Solution Framework (MSF), Oracle Method, Rational Unified Process (RUP), Structural Analysis



Рис. 1. Проблемная триада концептуального проектирования ПО

and Design Technique (SADT), а также такие программные средства, как Microsoft Project, Primavera Project Planner, BPwin и др. По мнению вице-президента компании PSM Consulting Ньюэлла (M. Newell), "программное обеспечение для управления проектами при правильном использовании может стать одним из самых ценных инструментов". При этом естественно возникает проблема оценки и выбора этих средств, т. е. оценки их функциональности и качества [8].

Проблемы анализа реалистичности разработки ПО прямо связаны с оценкой оправданности вложения в его разработку трудовых и материальных затрат или, по выражению В. В. Липаева, "оценкой реализуемости проекта в условиях и ресурсах, предлагаемых заказчиком" [9]. Как справедливо заметила директор консалтинговой группы "СЭТ" И. Абрамова, "следствием перманентного цейтнота являются не только стрессы сотрудников, но и практически полное отсутствие подготовительного этапа работы над проектом".

Оценка реалистичности (или, как часто говорят, **жизнеспособности, реализуемости**) **разработки программного проекта (РРПП)** позволяет спрогнозировать успешность его выполнения еще на концептуальной стадии. Однако такой прогноз существенно усложняется наличием так называемых **НЕ-факторов** внешней и внутренней среды проекта, отражающих **неполноту знаний, их недостоверность, а также нечеткость и неточность, относящихся к их содержанию.** Сюда можно отнести: неполноту исходных данных для проектирования; изменение требований, сроков и объема выделяемых ресурсов на проектирование; слабую структурированность теоретических и фактических знаний о проекте.

Из теории и практики программной инженерии известно, что преодолеть неопределенность при управлении ПП только лишь формальными методами невозможно. Как подчеркивал Негойца (С. V. Negoita), "искусство разрешать, а в некоторых случаях просто "терпеть" неопределенности требует новых методов". Здесь необходим неформальный акт, связанный с привлечением тех или иных правдоподобных гипотез информированности об источниках и механизмах возникновения факторов, порождающих неопределенность. Здесь весьма перспективно использование бурно развивающегося в рамках теории искусственного интеллекта нового научного направления, провозглашенного Заде (L. A. Zadeh) и получившего название "**мягкие вычисления**" (Soft Computing) или "**вычислительный интеллект**" (Computational Intelligence) [10].

Основополагающим принципом мягких вычислений является "терпимость к неточности, неопределенности и частичной истинности для достижения удобства манипулирования, робастности, низкой стоимости решения и лучшего согласия с реальностью". Применительно к анализу РРПП

наиболее интересны следующие составляющие мягких вычислений:

- ◆ **нечеткие методы** [11] для количественной оценки реалистичности разработки проекта по отдельным критериям и последующего многокритериального выбора приемлемого альтернативного варианта проекта при наличии нечетких целей и начальных условий;
 - ◆ **байесовские сети доверия** [12] для количественной оценки проектных рисков, позволяющие исследовать составляющие риска, включать максимальное число факторов, порождающих его, а также рассчитывать их при различных сценариях "что, если" в случае неполной, неточной и противоречивой информации;
 - ◆ **генетические алгоритмы** [13] для оптимизации распределения проектных ресурсов, обеспечивающие нахождение приемлемого по срокам и стоимости альтернативного варианта разработки проекта при максимально эффективном использовании ресурсов;
 - ◆ **агентные технологии** [14] для организации и планирования проектных работ, позволяющие наиболее эффективно скоординировать деятельность разработчиков по выполнению проекта в условиях максимального использования располагаемых трудовых и материальных ресурсов.
- Обсудим возможность применения концепции нечетких методов к оценке реалистичности ПП.

Нечетко-множественный подход к оценке реалистичности разработки программных проектов

Ключевым в оценке РРПП является акт принятия решения, который представляет собой сложный и систематизированный процесс выбора наиболее эффективного варианта из множества альтернатив. В теории принятия решений [15] существует много подходов к структуризации процесса принятия решения с выделением ряда этапов. Поскольку все они характеризуются так называемым процессуальным инвариантом, т. е. определенным сходством структуры процесса принятия решения, то возникает естественное желание сформировать его универсальную "типовую" схему с наиболее целесообразной последовательностью этапов выработки решения. Такая схема фигурирует в работах О. И. Ларичева (см., например, [16]), где выделены три этапа выработки решения: поиск информации, поиск и нахождение альтернатив, выбор лучшей альтернативы.

Следуя данной схеме, автором была предложена в работе [17] и получила развитие в работах [7, 18] следующая трехэтапная процедура принятия решения в задаче оценки РРПП:

- ◀ формирование альтернатив разработки проекта;
- ◀ оценка реалистичности каждой альтернативы разработки проекта;

◀ выбор наиболее приемлемой альтернативы разработки проекта.

Реализация первого этапа данной процедуры основана на методах сетевого и календарного планирования, часто именуемых методами сетевого программирования [19]. Здесь ограничиваются рассмотрением всего нескольких, наиболее реалистичных альтернатив [18, 20], поскольку рассмотрение большого их числа сопряжено с большими трудовыми и временными затратами и может привести к путанице, несогласию и конфликтам в процессе принятия решения.

Реализация второго и третьего этапов процедуры принятия решения по оценке РРПП связана с решением трудоемких задач, способным повлиять на исход всего проекта. Оценка реалистичности каждой возможной альтернативы разработки проекта основана на определении и выборе критериев (показателей), адекватно отражающих влияние каждой альтернативы на достижение цели проекта при существующих ограничениях (временного, финансового, технического и другого характера). Принципиальной особенностью данных этапов является многокритериальность оценки РРПП, порождающая соответствующие многокритериальные задачи выбора, связанные с упорядочением альтернатив разработки проекта и выделением из них наиболее приемлемой альтернативы.

В условиях неопределенности исходных данных проблема формирования, оценки и выбора альтернативы проекта существенно усложняется. Различают три типа неопределенности исходных данных, предполагающие наличие соответственно трех вариантов информации о значениях ресурсов (объеме и продолжительности работ) для выполнения проекта:

- *вероятностную* при наличии статистической информации о значениях ресурсов [21];
- *интервальную* при наличии информации о диапазоне изменения значений ресурсов [22];
- *нечеткую* при наличии "размытой" информации о значениях ресурсов [23].

В случае вероятностной неопределенности исходных данных, т. е. если изменения объема и времени выполнения проектных работ подчиняются вероятностному закону, весьма эффективен вероятностно-статистический подход к реализации второго и третьего этапов процедуры принятия решения по оценке РРПП, разработанный автором и изложенный в работах [7, 18, 20]. В основу данного подхода положен метод "Обращение—Сдвиг", позволяющий рассчитывать вероятности выполнения работ путем решения обратной вероятностной задачи для нахождения вероятности выполнения работ по предполагаемому их объему и ожидаемому времени выполнения. Однако часто исходная статистическая информация по некоторым параметрам разрабатываемого РРПП либо не достаточно репрезентативна,

что обусловлено уникальностью каждого проекта, либо просто отсутствует. В этом случае применение вероятностно-статистического аппарата для оценки РРПП невозможно [24—27].

Более реальна ситуация, когда исходные данные о времени и объемах выполнения проектных работ являются нечеткими, т. е. обладают "размытостью". В этом случае на первом этапе процедуры принятия решения по оценке РРПП можно воспользоваться известными нечеткими методами сетевого и календарного планирования (см., например [21—23]). Для второго и третьего этапов процедуры предлагается нечетко-множественный подход, основанный на использовании аппарата нечетких множеств и лингвистических переменных. Здесь в качестве гипотезы информированности, позволяющей "устранить" исходную нечеткую неопределенность, принимаются функции принадлежности, которые, по утверждению Н. Н. Моисеева, "дают субъективное представление эксперта (исследователя) об особенностях исследуемой операции, о характере ограничений и целей исследования. Это всего лишь новая форма утверждения гипотез, но она открывает и новые возможности".

Формирование и оценка реалистичности разработки программного проекта в условиях нечеткости исходных данных

Идея нечетко-множественного подхода к оценке РРПП заключается в построении и анализе возможных альтернатив разработки проекта в виде сетевых графиков выполнения проектных работ — ориентированных графов (V, E) , дуги которых соответствуют проектным работам, вершины — моментам их начала и окончания, а веса — их объемам. Оценка каждой i -й альтернативы разработки проекта осуществляется на основе специально сформированного нечеткого показателя реалистичности в виде критического пути, длительность которого представляется нечетким числом

$$\Delta^{(i)} = [T^{(i)-}, T^{(i)+}], i = \overline{1, m},$$

где $T^{(i)-}$, $T^{(i)+}$ — минимальное и максимальное время выполнения i -й альтернативы, а m — число альтернатив разработки проекта.

Данный подход позволяет на стадии анализа РРПП принять решение в условиях неопределенности об отказе от анализируемой альтернативы проекта, либо о его запуске в производство, либо о формировании его новых возможных альтернатив.

Пусть задана производительность разработчиков проекта в виде четкого отображения:

$$T_n = \psi_{j,n}(V_j^{(i)}), i = \overline{1, m}, j = \overline{1, k_i},$$

где T_n — время выполнения работ n -м разработчиком, $V_j^{(i)}$ — объем работ, а k_i — число видов работ

в i -й альтернативе разработки проекта. Пусть также заданы альтернативы сетевых графиков выполнения проектных работ с указанием объема для каждой работы в виде трапециевидного нечеткого числа:

$$V_j^{(i)} = (V_{j,1}^{(i)}, V_{j,2}^{(i)}, V_{j,3}^{(i)}, V_{j,4}^{(i)}),$$

где $V_{j,1}^{(i)}$ — пессимистическая оценка выполнения объема работ, $[V_{j,2}^{(i)}, V_{j,3}^{(i)}]$ — интервал ожидаемого (возможного) объема работ; $V_{j,4}^{(i)}$ — оптимистическая оценка выполнения объема работ.

Для расчета показателя $\Delta^{(i)}$, характеризующего реалистичность i -и проектной альтернативы, предлагается следующий **четырёхэтапный алгоритм**.

На первом этапе на основе параметрического подхода [28] строятся функции принадлежности $\mu_{\tilde{B}}(V_j^{(i)})$ нечеткого множества \tilde{B} — ожидаемого объема выполнения работ из интервала $[V_{j,2}^{(i)}, V_{j,3}^{(i)}]$ для различных m альтернативных вариантов сетевых графиков выполнения работ; здесь нечеткая информация об объемах проектных работ формируется на основе опроса мнения группы разработчиков.

На втором этапе строятся функции принадлежности $\mu_{\tilde{A}}(T_j^{(i)})$ нечеткого множества \tilde{A} — ожидаемого времени выполнения работ для различных m вариантов сетевых графиков выполнения работ с указанными нечеткими числами $V_j^{(i)}$ и производительностями разработчиков; здесь ожидаемые времена выполнения работ в виде трапециевидного нечеткого числа

$$T_j^{(i)} = (T_{j,1}^{(i)}, T_{j,2}^{(i)}, T_{j,3}^{(i)}, T_{j,4}^{(i)}),$$

где $T_{j,1}^{(i)}$ — пессимистическая оценка времени выполнения работ, $[T_{j,2}^{(i)}, T_{j,3}^{(i)}]$ — интервал ожидаемого времени выполнения работ; $T_{j,4}^{(i)}$ — оптимистическая оценка времени выполнения работ, рассчитываются по функциям принадлежности нечеткого множества, соответствующего оценке "возможного объема проектных работ из интервала $[V_{j,2}^{(i)}, V_{j,3}^{(i)}]$ " и производительностям разработчиков проекта.

На третьем этапе на основе известных методов [22, 23] рассчитывается длительность критического пути (критического времени выполнения проекта) $\Delta^{(i)}$ для каждой i -й альтернативы разработки проекта.

На четвертом этапе на основании интуиции или опыта по интервалам времени $[T^{(i)-}, T^{(i)+}]$, либо по средним значениям этих интервалов на основе анализа множества характеристик $\Delta^{(i)}$, $i = \overline{1, m}$,

осуществляется выбор приемлемой альтернативы разработки проекта.

Положим, что в контексте рассматриваемой задачи роль времени выполнения работ $T_j^{(i)}$ играет множество X , а роль объемов работ $V_j^{(i)}$ — множество Y , значения которых будем обозначать соответственно через x и y . Считаем, что производительность разработчиков $T_n = \psi_{j,n}(V_j^{(i)})$, т. е. отображение (зависимость) $y = \varphi(x)$ — известная четкая, монотонная, возрастающая функция.

Нетрудно видеть, что первые два этапа алгоритма решения задачи расчета показателя $\Delta^{(i)}$ сводятся к нахождению по имеющейся функции принадлежности $\mu_{\tilde{B}}(y)$ нечеткого множества \tilde{B} и известного четкого отображения $\varphi(x)$ функции принадлежности $\mu_{\tilde{A}}(x)$. Поскольку необходимо найти ожидаемое время, за которое может быть выполнен заданный объем работ, то данная задача является обратной к исходной задаче, и для ее решения можно использовать метод, описанный в [29]. Данный метод реализует следующую **четырёхшаговую процедуру** (графическая иллюстрация метода представлена на рис. 2).

На первом шаге строится функция принадлежности $\mu_{\tilde{B}}(y)$ (кривая 1) нечеткого множества \tilde{B} .

На втором шаге на основе функции принадлежности $\mu_{\tilde{B}}(y)$ (кривая 1) формируются интервалы достоверности $[y_{pн}, y_{рк}]$ посредством задания α -уровней, причем при достаточно малом шаге $\alpha_p \in [0, 1]$, $p = 1, 2, \dots$, изменения значения α можно получить достаточно большое число интервалов достоверности.

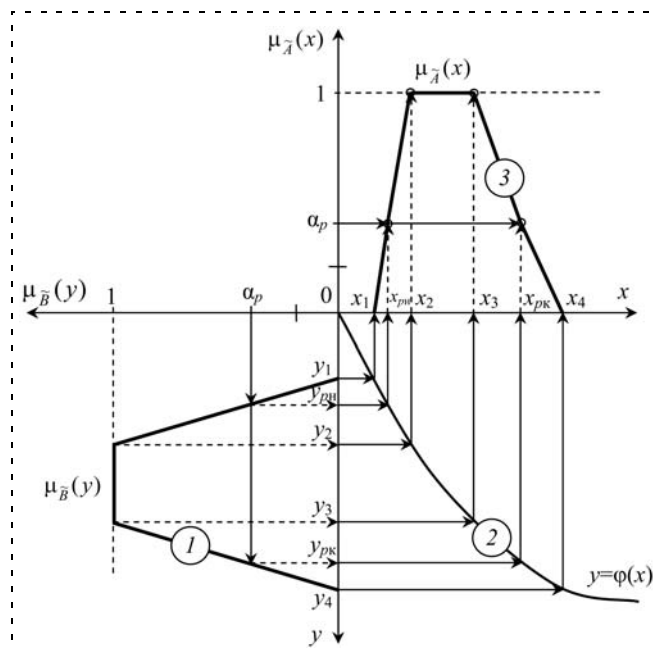


Рис. 2. Графическая иллюстрация построения функции принадлежности $\mu_{\tilde{A}}(x)$ при четком отображении

На третьем шаге формируются интервалы достоверности $[x_{pн}, x_{pк}]$ посредством обращения четкого отображения $y = \varphi(x)$ (кривая 2).

На четвертом шаге осуществляется построение функции принадлежности $\mu_{\tilde{A}}(x)$ (кривая 3) по интервалам достоверности $[x_{pн}, x_{pк}]$ и по значениям трапециевидного нечеткого числа $x = (x_1, x_2, x_3, x_4)$.

На рис. 2 $y = (y_1, y_2, y_3, y_4)$ и $x = (x_1, x_2, x_3, x_4)$ — трапециевидные нечеткие числа, где x_1, y_1 — нижние границы интервала, $[x_2, x_3]$ и $[y_2, y_3]$ — интервалы наиболее ожидаемых значений анализируемых параметров, x_4, y_4 — верхние границы интервала; $[x_{pн}, x_{pк}]$ и $[y_{pн}, y_{pк}]$ — интервалы достоверности нечеткого множества \tilde{A} и \tilde{B} на α_p -уровне, причем $x_{pн}, y_{pн}$ — начало, а $x_{pк}, y_{pк}$ — конец данных интервалов.

Прокомментируем смысл функции принадлежности $\mu_{\tilde{A}}(x)$, представленной на рис. 2. Элементы x со значениями в интервале $[x_2, x_3]$ принадлежат нечеткому множеству \tilde{A} , так как для них значение функции принадлежности $\mu_{\tilde{A}}(x) = 1$. Элементы x со значениями в интервалах $[x_1, x_2]$ и $[x_3, x_4]$ принадлежат нечеткому множеству \tilde{A} "в той или иной степени", причем эта степень тем выше, чем ближе значение x к центральному интервалу $[x_2, x_3]$.

Применение α -уровней на втором шаге обусловлено тем, что оно упрощает процедуру извлечения знаний от разработчиков для построения функции принадлежности $\mu_{\tilde{A}}$: разработчику необходимо формализовать свои представления о возможных значениях оцениваемой величины путем задания характеристической функции множества значений, которые она может принимать.

Выбор приемлемой реалистичной альтернативы программных проектов в условиях нечеткой многокритериальности

Очевидно, что целесообразна не однокритериальная, а многокритериальная оценка РРПП на основе векторного критерия, характеризующего технические, финансовые, экономические и коммерческие показатели разрабатываемого проекта [18]. Наиболее известными многокритериальными методами принятия решений являются: многокритериальная теория полезности, метод анализа иерархий, эвристические методы, теория свидетельств Демпстера-Шейфера (Dempster-Shafer), принцип Эджворта-Парето (Edgeworth-Pareto) и др. В случае неопределенности исходной информации и, в частности ее "размытости", наиболее перспективными методами многокритериальной оценки и выбора альтернатив проекта являются нечеткие методы [11, 28, 30].

Рассмотрим следующую задачу нечеткой многокритериальной оценки и выбора альтернативы разработки проекта.

Пусть имеется $F_i, i = \overline{1, n}$, альтернативных вариантов разработки проекта, которые оцениваются скалярными критериями $C_j, j = \overline{1, m}$. Требуется на основе ранжирования альтернатив выбрать приемлемый альтернативный вариант разработки проекта.

Для решения данной задачи можно воспользоваться следующей трехэтапной процедурой.

На первом этапе для каждого скалярного критерия C_j формируется нечеткое множество

$$\tilde{C}_j = \{C_{j1}(F_1), C_{j2}(F_2), \dots, C_{jn}(F_n)\}, j = \overline{1, m},$$

с элементами

$$C_{ji}(F_i) = \frac{1}{F_i} \mu_{C_j}(F_i), i = \overline{1, n},$$

где $\mu_{C_j}(F_i)$ — степень принадлежности i -го элемента F_i множеству \tilde{C}_j .

На втором этапе находятся степени принадлежности $\mu_{C_j}(F_i) = w_i, i = \overline{1, n}$ нечеткого множества \tilde{C}_j , на основе метода парных сравнений Саати [39], которые задаются в виде матрицы. Здесь степени принадлежности $\mu_{C_j}(F_i) = w_i, i = \overline{1, n}$, принимаются равными координатам собственного вектора $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ матрицы парных сравнений A , который находится следующим образом:

$$\begin{cases} AW = \lambda_{\max} W; \\ w_1 + w_2 + \dots + w_n = 1, \end{cases}$$

где λ_{\max} — наибольшее собственное значение матрицы A .

Для каждой пары альтернатив разработчик по критерию C_j оценивает преимущество одной альтернативы перед другой по правилу: чем больше число $\mu_{C_j}(F_i)$, тем предпочтительнее альтернатива F_i по критерию C_j .

На третьем этапе осуществляется ранжирование и выбор приемлемой альтернативы. Здесь, согласно принципу Беллмана-Заде [31], наилучшей будет альтернатива, которая в наибольшей степени одновременно удовлетворяет всем критериям. Так, например, пусть α_j — коэффициент относительной важности критерия $C_j, (\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_m = 1)$, причем, чем важнее критерий, тем больше значение α_j . Пусть далее $\tilde{C}_j^{\alpha_j}, j = \overline{1, m}$, — нечеткое множество, характеризующее альтернативы разработки проекта

с точки зрения важности критерия C_j , тогда нечеткое решение может быть записано в виде пересечения критериев $\tilde{C}_j^{\alpha_j}$:

$$\begin{aligned} \tilde{D} &= \tilde{C}_1^{\alpha_1} \cap \tilde{C}_2^{\alpha_2} \cap \dots \cap \tilde{C}_m^{\alpha_m} = \\ &= \{D_1(F_1), D_2(F_2), \dots, D_n(F_n)\}, \end{aligned}$$

где

$$D_i(F_i) = \frac{1}{F_i} \min_{j \in [1; m]} \mu_{C_j}^{\alpha_j}(F_i), \quad i = \overline{1, n}.$$

Здесь значения коэффициентов относительной важности критериев C_j могут быть определены различными способами, например, с помощью метода парных сравнений Саати.

В качестве наилучшего варианта разработки проекта выбирается альтернатива, для которой функция принадлежности имеет наибольшее значение:

$$D = \arg \max \{ \mu_D(F_2), \dots, \mu_D(F_n) \}.$$

Пример. Рассмотрим численный пример, поясняющий изложенный подход к выбору приемлемой альтернативы разработки проекта. Пусть имеется четыре альтернативы (F_1, F_2, F_3, F_4) разработки проекта, описываемые совокупностью критериев реалистичности: C_1 — время выполнения проекта, мес.; C_2 — стоимость проекта, тыс. руб.; C_3 — срок окупаемости, мес.; C_4 — вероятность успеха проекта [18, 20]) в условиях возникновения ситуаций, при которых цели, поставленные в проекте, могут быть не достигнуты полностью или частично. Ставится задача ранжирования альтернатив применительно к выбору приемлемой альтернативы для дальнейшей разработки проекта.

Расчетные значения критериев для каждой альтернативы представлены в табл. 1. В примере время выполнения проекта оценивается на основе методики, описанной в предыдущем разделе.

Предположим, что сравнения альтернатив по критериям C_1, \dots, C_4 известны и приведены в табл. 2. По каждому критерию сравнивались шесть пар альтернатив. При этом отсутствию преимуществ соответствует 1, слабому преимуществу — 3, существенному — 5, явному — 7.

На основе высказываний разработчиков строятся матрицы парных сравнений, причем в каждой матрице шесть элементов соответствуют парным сравнениям из табл. 2, а остальные элементы строятся из условия, что матрица является диагональной и обратной симметричности. При этом степень согласованности [32] всех мнений разработчиков считается приемлемой, поскольку отношение согласованности (ОС) $ОС \leq 0,1$.

Таблица 1

Расчетные значения критериев реалистичности альтернатив

Альтернативы проекта	Критерии реалистичности альтернатив			
	C_1	C_2	C_3	C_4
F_1	9,2	630	3	0,81
F_2	12	700	3,8	0,87
F_3	8	600	3,2	0,7
F_4	10	650	4	0,83

Таблица 2

Парные сравнения альтернатив по шкале Саати

Критерии реалистичности	Парные сравнения альтернатив	
	F_1 над F_2	F_3 над F_4
C_1	Существенное преимущество F_1 над F_2 Почти слабое преимущество F_1 над F_4 Слабое преимущество F_3 над F_1	Существенное преимущество F_3 над F_2 Существенное преимущество F_3 над F_4 Существенное преимущество F_4 над F_2
C_2	Существенное преимущество F_1 над F_2 Почти слабое преимущество F_1 над F_4 Почти слабое преимущество F_3 над F_1	Существенное преимущество F_3 над F_2 Слабое преимущество F_3 над F_4 Слабое преимущество F_4 над F_2
C_3	Существенное преимущество F_1 над F_2 Почти слабое преимущество F_1 над F_3 Существенное преимущество F_1 над F_4	Почти слабое преимущество F_2 над F_4 Слабое преимущество F_3 над F_2 Почти слабое преимущество F_3 над F_4
C_4	Отсутствие преимущества F_3 над F_1 Почти слабое преимущество F_2 над F_1 Явное преимущество F_2 над F_3	Почти слабое преимущество F_2 над F_4 Отсутствие преимущества F_3 над F_4 Почти слабое преимущество F_4 над F_1

С учетом того, что степени принадлежности принимаются равными координатам собственного вектора матрицы парных сравнений, получаются следующие нечеткие множества:

$$\tilde{C}_1 = \left\{ \frac{0,239}{F_1}, \frac{0,057}{F_2}, \frac{0,546}{F_3}, \frac{0,157}{F_4} \right\};$$

$$\tilde{C}_2 = \left\{ \frac{0,297}{F_1}, \frac{0,068}{F_2}, \frac{0,469}{F_3}, \frac{0,166}{F_4} \right\};$$

$$\tilde{C}_3 = \left\{ \frac{0,519}{F_1}, \frac{0,123}{F_2}, \frac{0,263}{F_3}, \frac{0,095}{F_4} \right\};$$

$$\tilde{C}_4 = \left\{ \frac{0,151}{F_1}, \frac{0,508}{F_2}, \frac{0,134}{F_3}, \frac{0,207}{F_4} \right\}.$$

Поскольку альтернатива F_1 является приемлемой по критерию C_3 , а альтернатива F_3 является приемлемой по критериям C_1 и C_2 , то окончательной выбор альтернативы будет зависеть от важности критериев реалистичности.

Для расчета коэффициентов относительной важности используется метод парных сравнений. Допустим, известны следующие лингвистические парные сравнения важности критериев: существенное преимущество C_2 над C_1 ; почти слабое преимущество C_2 над C_4 ; слабое преимущество C_3 над C_1 ; почти слабое преимущество C_3 над C_2 ; почти слабое преимущество C_4 над C_1 ; существенное преимущество C_4 над C_3 .

На основе высказываний разработчиков строится матрица парных сравнений важности критериев. Применяя те же подходы, что и при нахождении вышеуказанных нечетких множеств, получаем следующие коэффициенты относительной важности критериев C_1, \dots, C_4 : $\alpha_1 = 0,08$; $\alpha_2 = 0,31$; $\alpha_3 = 0,23$; $\alpha_4 = 0,38$.

Таким образом, при принятии решения наиболее важным является критерий стоимости проекта (C_2) и критерий вероятности успеха проекта (C_4). С учетом важности данных критериев получаются следующие нечеткие множества:

$$\tilde{C}_1^{\alpha_1} = \left\{ \frac{0,239^{0,08}}{F_1}, \frac{0,057^{0,08}}{F_2}, \frac{0,546^{0,08}}{F_3}, \frac{0,157^{0,08}}{F_4} \right\} = \left\{ \frac{0,891}{F_1}, \frac{0,793}{F_2}, \frac{0,952}{F_3}, \frac{0,861}{F_4} \right\};$$

$$\tilde{C}_2^{\alpha_2} = \left\{ \frac{0,297^{0,31}}{F_1}, \frac{0,068^{0,31}}{F_2}, \frac{0,469^{0,31}}{F_3}, \frac{0,166^{0,31}}{F_4} \right\} = \left\{ \frac{0,686}{F_1}, \frac{0,435}{F_2}, \frac{0,791}{F_3}, \frac{0,573}{F_4} \right\};$$

$$\tilde{C}_3^{\alpha_3} = \left\{ \frac{0,519^{0,23}}{F_1}, \frac{0,123^{0,23}}{F_2}, \frac{0,263^{0,23}}{F_3}, \frac{0,095^{0,23}}{F_4} \right\} = \left\{ \frac{0,859}{F_1}, \frac{0,615}{F_2}, \frac{0,734}{F_3}, \frac{0,579}{F_4} \right\};$$

$$\tilde{C}_4^{\alpha_4} = \left\{ \frac{0,151^{0,38}}{F_1}, \frac{0,508^{0,38}}{F_2}, \frac{0,134^{0,38}}{F_3}, \frac{0,207^{0,38}}{F_4} \right\} = \left\{ \frac{0,489}{F_1}, \frac{0,773}{F_2}, \frac{0,466}{F_3}, \frac{0,549}{F_4} \right\}.$$

В результате пересечений критериев получается нечеткое множество

$$\tilde{D} = \left\{ \frac{0,489}{F_1}, \frac{0,435}{F_2}, \frac{0,466}{F_3}, \frac{0,549}{F_4} \right\},$$

которое свидетельствует о преимуществе альтернативы F_4 разработки проекта перед остальными, поскольку альтернатива F_4 лучше других одновременно удовлетворяет всем критериям с учетом их важности.

Многокритериальный подход к выбору приемлемой альтернативы разработки проекта может осуществляться на основе различных методов, основой которых является комплексный анализ критериев альтернатив.

Таким образом, в настоящей статье рассмотрен нечетко-множественный подход к оценке РРПП на основе предложенных автором в работах [17, 18] алгоритмов с учетом нечеткой исходной информации. В случае, когда имеется лишь интервальная исходная информация, т. е. известны лишь границы изменения значений анализируемого параметра разрабатываемого проекта, естественно целесообразно использовать интервальный подход к оценке РРПП, который является, фактически, частным случаем изложенного нечетко-множественного подхода.

Список литературы

1. **Официальный сайт Президента России**, Дмитрий Медведев. 2010. URL: <http://archive.kremlin.ru>
2. **Теряев Е. Д., Филимонов Н. Б., Петрин К. В.** Мехатроника как компьютерная парадигма развития технической кибернетики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 6. С. 2—10.
3. **Бошняков А. А., Овсянников С. В.** Проектирование алгоритмического и программного обеспечения мехатронных систем: Учеб. пособ. М: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007.
4. **Программное обеспечение промышленных роботов** / Отв. ред. А. К. Платонов. М.: Наука, 1986.
5. **Макконнелл С.** Сколько стоит программный проект. М.: Русская редакция, СПб.: Питер, 2007.
6. **Архипенков С. Я.** Лекции по управлению программными проектами. М., 2009. URL: http://www.arkhipenkov.ru/resources/sw_project_management.pdf
7. **Колоденкова А. Е.** Задачи программного инжиниринга сложных систем на основе критерия жизнеспособности проекта // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Тр. XII Междунар. конф. Самара: СамНЦ РАН, 2010. С. 593—598.
8. **Гвоздев В. Е., Колоденкова А. Е.** Системные вопросы проектирования программных продуктов. Уфа: УГАТУ, АН РБ, Гилем, 2010.
9. **Липаев В. В.** Программная инженерия. Методологические основы: учеб. М.: ГУ-ВШЭ, ТЕИС, 2006.
10. **Заде Л. А.** Роль мягких вычислений и нечеткой логики в понимании, конструировании и развитии информационных/интеллектуальных систем // Новости искусственного интеллекта. 2001. № 2—3. С. 7—11.
11. **Птушкин А. С.** Нечеткие модели и методы в менеджменте. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008.
12. **Тулупьев А. Л., Сироткин А. В., Николенко С. И.** Байесовские сети доверия: логико-вероятностный вывод в ациклических направленных графах. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2009.
13. **Гладков Л. А., Курейчик В. В., Курейчик В. М.** Генетические алгоритмы / под ред. В. М. Курейчика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006.

14. Плескач В. Л., Рогушина Ю. В. Агентные технологии. М.: Киев: КНТЕУ, 2005.
15. Орлов А. И. Теория принятия решений. М.: Март, 2004.
16. Ларичев О. И. Теория и методы принятия решений, а также Хроника событий в Волшебных Странах. М.: Логос, 2000.
17. Колоденкова А. Е. Статистический подход к оценке реалистичности программных проектов для автоматизированных информационно-управляющих систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 4. С. 52—60.
18. Колоденкова А. Е. Анализ жизнеспособности — важная стадия жизненного цикла инновационных программных проектов // Программная инженерия. 2010. № 1. С. 18—25.
19. Бурков В. Н., Буркова И. В. Метод сетевого программирования в задачах управления проектами // Управление большими системами. М.: ИПУ РАН, 2010. С. 40—61.
20. Колоденкова А. Е. Проблемы концептуального проектирования программного обеспечения мехатронных систем // Мехатроника, автоматизация, управление: Матер. 7-й науч.-техн. конф. С.-Петербург: ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", 2010. С. 228—231.
21. Голенко-Гинзбург Д. И. Стохастические сетевые модели планирования и управления разработками: Монография. Воронеж: Научная книга, 2010.
22. Федорова И. В. Критичность в сетях с интервальными продолжительностями операций // Проблемы информационной экономики. Вып. VI. Моделирование инновационных процессов и экономической динамики: Сб. науч. трудов. Под ред. Р. М. Нижегородцева. М.: ЛЕНАНД, 2006. С. 351—362.
23. Акимов В. А., Балашов В. Г., Заложнев А. Ю. Метод нечеткого критического пути / Управление большими системами. Вып. 3. М.: ИПУ РАН, 2003. С. 5—10.
24. Смоляк С. А. Оценка эффективности инвестиционных проектов в условиях риска и неопределенности. М.: Наука, 2002.
25. Недосекин А. О. Финансовый менеджмент в условиях неопределенности: вероятности или нечеткие множества? URL: http://www.fmanalis.ru/litra /328/2329.html? sphrase_id=44022
26. Деревянко П. М. Оценка проектов в условиях неопределенности. URL: http://www.cfin.ru/fmanalysis/invest/fuzzy_analysis.shtml
27. Шашкин А. И., Ширяев М. М. Календарное планирование работ по проекту на основе нечетких исходных данных // Вестник СамГУ. Естественнонаучная серия. 2008. №3(62). С. 208—216.
28. Борисов А. Н., Крумберг О. А., Федоров И. П. Принятие решений на основе нечетких моделей. Примеры использования. Рига: Зинатне, 1990.
29. Губко М. В. Лекции по принятию решений в условиях нечеткой информации. URL: <http://www.mtas.ru/Library/uploads/1099037698.pdf>
30. Андрейчиков А. В., Андрейчикова О. Н. Анализ, синтез и планирование решений в экономике. М.: Финансы и статистика, 2002.
31. Беллман Р., Заде Л. Принятие решений в расплывчатых условиях. В кн.: Вопросы анализа и процедуры принятия решений. М.: Мир, 1976. С. 172—215.
32. Саати Т., Керис К. Аналитическое планирование. Организация систем. М.: Радио и связь, 1991.

УДК 004.89

О. В. Карсаев, канд. тех. наук, зав. лаб.,
В. Г. Конюший, науч. сотр.,
В. В. Тихомиров, мл. науч. сотр.,
Д. В. Троцкий, мл. науч. сотр.,
 Санкт-Петербургский институт
 информатики и автоматизации РАН
 ok@iias.spb.ru

Многоагентная система планирования работ на космодроме Байконур

Описывается программный комплекс, реализующий многоагентный подход для решения задач стратегического и оперативного планирования работ подготовки и пуска ракет космического назначения с космодрома Байконур.

Ключевые слова: многоагентная система, онтология, стратегическое и оперативное планирование

Введение

Планирование миссий — процессов подготовки и пуска ракет космического назначения (РКН) — на космодроме Байконур является достаточно сложной задачей. Под планированием в данном случае понимается расчет графиков работ с учетом допустимого распределения эксплуатирующего персонала между работами. Каждая миссия в зависимости от состава РКН предполагает проведение от двух до пяти десятков комплексов работ (КР). Эти КР проводятся разными эксплуатирующими подразделе-

ниями (ЭП) на разных комплексах технических средств (КТС) и предусматривают проведение нескольких десятков или сотен работ. Выполнение работ, как правило, требует участия нескольких сотрудников ЭП. В дополнение к этому следует отметить, что ЭП нередко приходится одновременно выполнять несколько КР для разных миссий. Кроме обеспечения самих миссий ЭП также должны проводить техническое обслуживание используемого оборудования в соответствии с определенными регламентными требованиями.

Сложность задачи планирования в данном случае существенно усугубляется спецификой процесса определения сроков пуска РКН. Первоначально, на горизонте годового планирования, сроки пусков согласовываются с заказчиками с точностью до квартала. В последующем сроки пусков РКН уточняются на горизонте квартального планирования в зависимости от готовности составных частей РКН и возможных сроков их доставки на космодром. Такой процесс не исключает возможности того, что проведение всех пусков в заранее запланированные периоды времени либо требует значительного использования внеурочного рабочего времени, либо вовсе становится невозможным в связи с текущей нагрузкой на ЭП космодрома и ограничениями по проведению необходимых работ.

Перечисленные обстоятельства с учетом перспективы дальнейшего развития космической отрасли в целом очевидным образом определяют высокую актуальность разработки и использования информационных технологий, необходимых для поддержки

процессов планирования и управления эксплуатацией ракетно-космических комплексов (РКК) космодрома Байконур. В связи с этим по инициативе ФГУП ЦЭНКИ — предприятия, осуществляющего эксплуатацию наземной космической инфраструктуры РКК космодрома Байконур, — выполняется проект, конечной целью которого является комплексная автоматизация процессов планирования и координации работ по подготовке и пуску РКН на РКК космодрома Байконур. Целью данной статьи является краткое описание исследований и достигнутых результатов в процессе выполнения этого проекта.

Цели и задачи проекта и архитектура программного комплекса

Данный проект предполагает выполнение последовательности этапов, два из которых уже завершены к настоящему времени. На первом этапе рассматривали задачу моделирования процессов планирования работ, выполняемых одним из наиболее нагруженных ЭП. Это подразделение эксплуатирует стартовые комплексы (СК) РКК "Протон". Основ-

ными целями решения данной задачи были, с одной стороны, анализ и оценка ограничений и максимальных возможностей этого ЭП, а с другой стороны, оценка эффективности и апробация предлагаемого подхода для решения задач планирования и управления применительно к данной предметной области. В качестве оценки эффективности рассматривали максимальное число пусков, которое может обеспечить это ЭП в течение года. Результаты моделирования показали, что с учетом состояния персонала на данный момент времени можно обеспечить до 12 пусков в год. Для сравнения следует привести статистику пусков с этих СК за последние три года [1]: в 2007 г. было осуществлено 7 пусков, а в 2008 и 2009 гг. — по 10 пусков.

Целью второго этапа было развитие программного комплекса для решения взаимосвязанных между собой задач стратегического и оперативного планирования применительно к отдельным ЭП космодрома Байконур. Под стратегическим планированием понимается предварительный расчет возможных сроков выполнения требуемых КР с учетом общей текущей загрузки ЭП. Решение этой задачи позволяет координировать деятельность различных

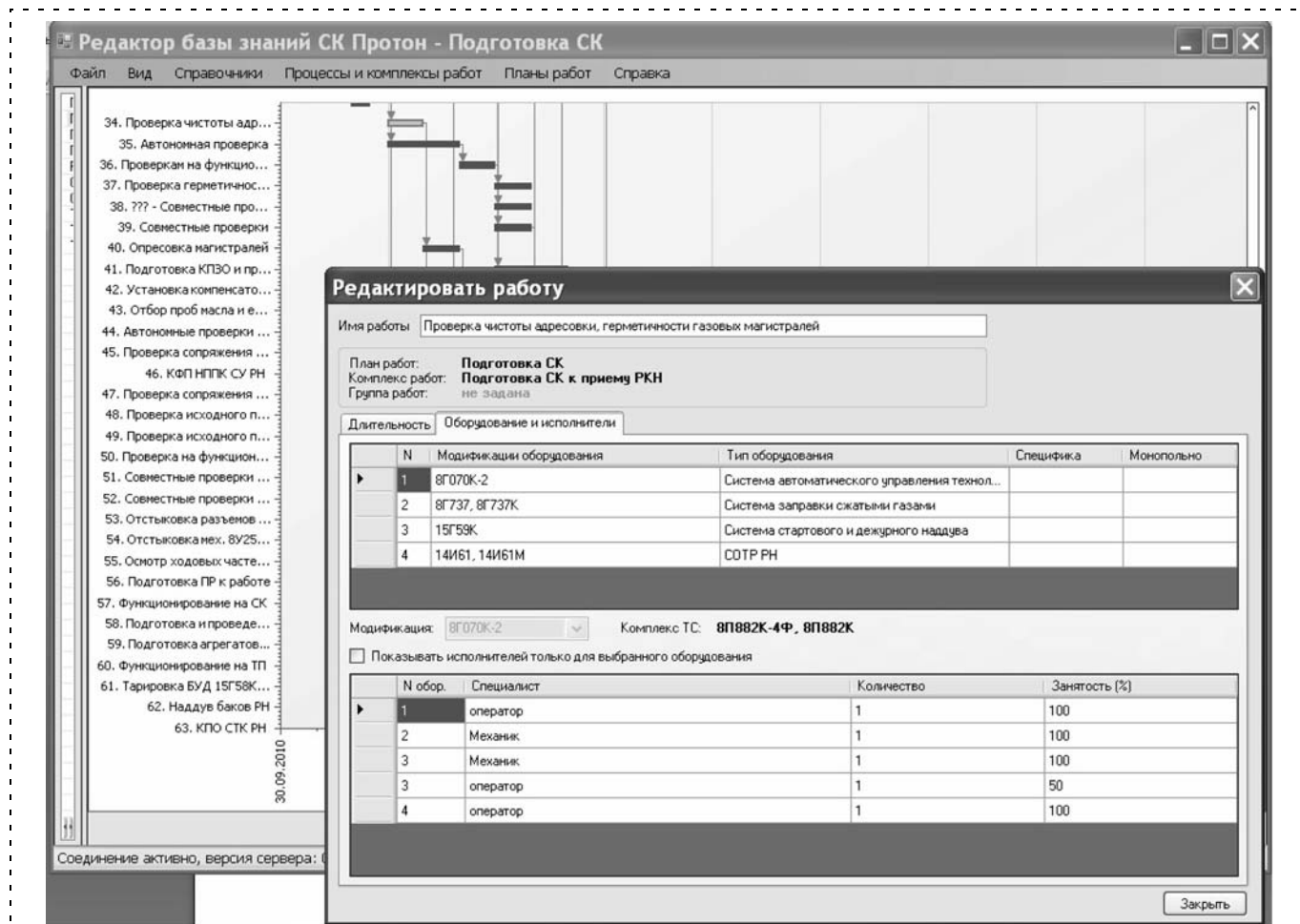


Рис. 1. Примеры экранных форм редактора БЗ

ЭП и планировать сроки выполнения миссий космодрома в целом. Под оперативным планированием понимается поддержка принятия решений в отношении порядка и сроков выполнения текущих работ и использования штатного персонала ЭП в соответствии с текущей ситуацией и в целях контроля выполнения сроков проведения КР, определенных на уровне стратегического планирования.

Основной задачей последующих этапов выполнения проекта является разработка распределенной системы планирования и контроля выполнения миссий на космодроме Байконур в целом. Элементами этой системы будут уже разработанные программные комплексы, используемые в ЭП космодрома для планирования "своих" работ, а также дополнительный программный комплекс, который будет использоваться во ФГУП ЦЭНКИ для координации процессов планирования и согласования сроков выполнения миссий и обеспечения взаимодействия всех элементов системы на основе многоагентной технологии.

Далее в статье кратко описывается разработанный программный комплекс, предназначенный для планирования работ в ЭП космодрома. Концептуальной основой этого программного комплекса является онтология данной предметной области. Ее описание приводится в следующем разделе статьи. На основе онтологии в каждом ЭП формируется своя база знаний (БЗ), содержащая все необходимые для формального описания постановки задачи планирования данные. Данные баз знаний являются экземплярами понятий и отношений, определенных в онтологии предметной области, и формируются экспертами ЭП с помощью редактора БЗ, входящего в состав программного комплекса. Примеры экранных форм редактора БЗ приведены на рис. 1.

Формируемые с помощью редактора БЗ используются второй подсистемой программного комплекса — подсистемой РПГ (расчет планов и графиков), — предназначенной для решения задач планирования. Описание этой подсистемы приводится после описания онтологии предметной области.

Онтология предметной области

Понятия онтологии на основе их семантики объединены в семь групп (рис. 2). Первая группа "Изделия и объекты работ" содержит понятия для описания составных частей РКН и объектов работ. Для описания видов и типов составных частей используются понятия "Вид изделия" и "Тип изделия".

Примерами экземпляров первого понятия являются *космический аппарат (КА)*, *разгонный блок (РБ)*, *ракетоноситель (РН)* и т. д. Второе понятие используется для описания типов изделий каждого вида. Например, типами РН являются "*Протон*", "*Союз*", "*Зенит*". Типы изделий служат основой для описания объектов работ с помощью понятий "Класс объектов" и "Класс изделий". Эти понятия

позволяют описывать объекты работ в виде отдельных типов изделий или в виде их совокупностей, когда объектами работ являются космическая головная часть (КГЧ) или РКН в целом. Эти понятия также позволяют группировать объекты работ таким образом, чтобы к каждой группе относились работы, выполняемые на одном типе КТС и в соответствии с одним технологическим процессом.

Вторая группа "Технологические процессы" содержит понятия для описания технологических процессов (ТП) подготовки РКН и ее составных частей, а также работы по техническому обслуживанию КТС. Понятие "Тип КР" используется для идентификации на абстрактном уровне всех типов комплексов работ (КР), выполняемых на различных комплексах оборудования. Примерами таких типов КР могут служить *подготовка стартового комплекса (СК) к приему РКН, подготовка и пуск РКН* и т. д. Типы КР служат основой для определения понятия "КР", которое сопоставляет типам КР объекты работ. Например, экземпляром этого понятия может быть *подготовка и пуск РКН "Союз" с пилотируемым КА*. Для описания сценариев ТП используются понятия "Тип отношений КР" и "Отношения КР", которые позволяют описать порядок выполнения КР. Понятие "Процессы" используется для группирования КР, выполняемых на одном типе КТС в рамках одной миссии.

Третья группа понятий "Комплексы и оборудование" используется для описания комплексов технических средств (КТС), на которых проводятся КР подготовки и пуска РКН. Для описания комплексов и их типов используются одноименные понятия "КТС" и "Тип КТС". Для описания оборудования используются понятия "Тип оборудования", "Модификация оборудования" и "Экземпляр оборудования". Под модификацией оборудования понимаются экземпляры оборудования одного типа, имеющие один и тот же индекс. Под экземпляром понимается конкретная (физическая) единица оборудования. Связь экземпляра оборудования с "КТС" указывает, на каком КТС этот экземпляр оборудования установлен и/или используется.

Предназначение КТС и варианты их использования описываются четвертой группой понятий "Предназначение комплексов". Понятие "Выполнение КР" позволяет сопоставить комплексам работ варианты планов их выполнения и КТС, на которых они могут выполняться. При этом для идентификации существующих вариантов планов работ используется понятие "План работ".

В пятой группе "Планы работ" определяются понятия для детального описания планов работ. Описание планов может выполняться в терминах работ и групп работ, которые определяются с помощью одноименных понятий. При этом под группой работ понимается объединение нескольких работ и/или других групп работ. Описание перечня типов оборудования, которое необходимо для выполнения

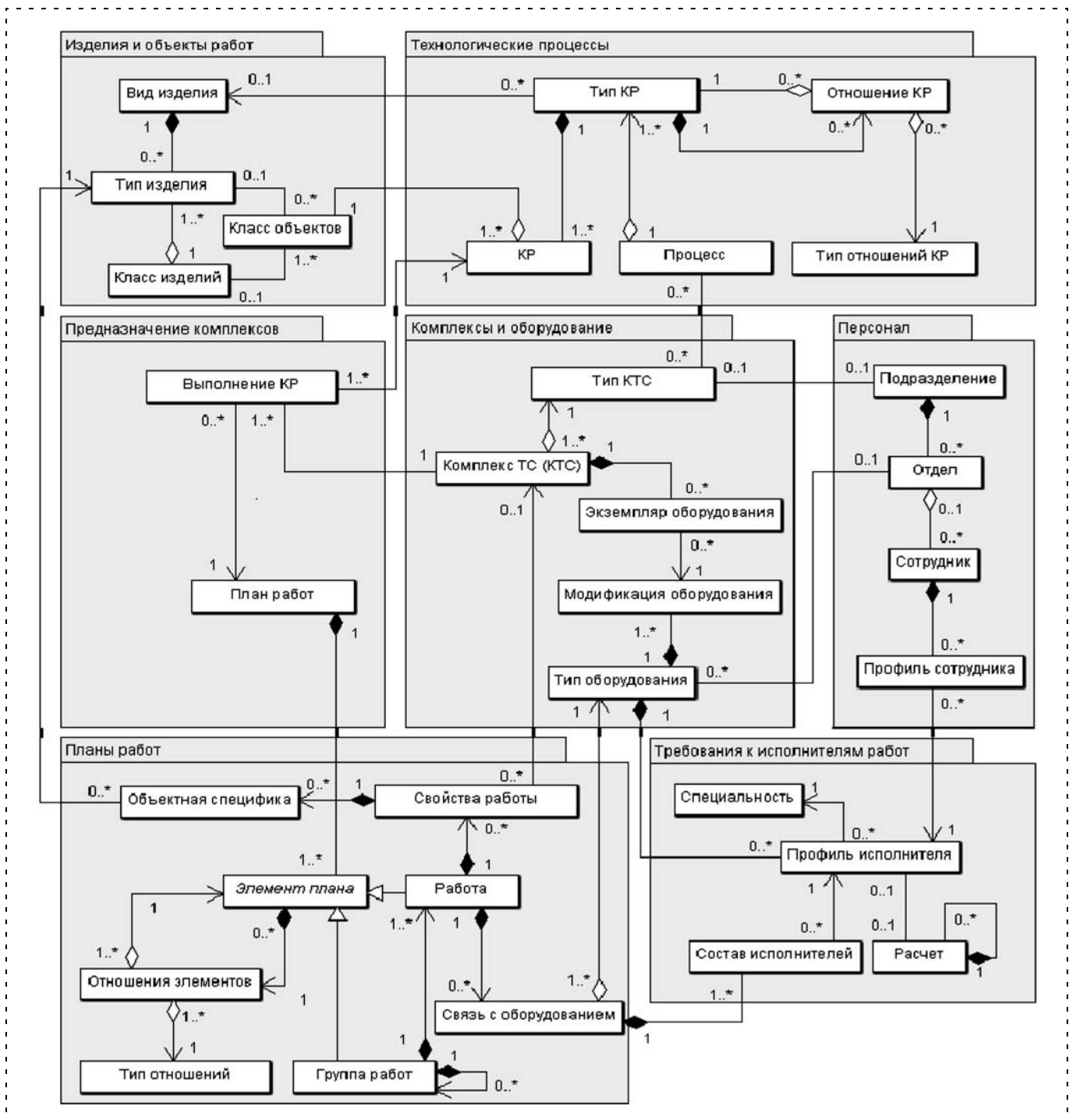


Рис. 2. Онтология предметной области

работы, осуществляется с помощью понятия "Связь с оборудованием". Понятие "Свойства работы" используется для уточнения общих параметров работы в зависимости от того, на каком КТС и с использованием каких конкретных единиц оборудования будет выполняться работа. Ограничения и порядок проведения работ в плане описываются с помощью понятий "Тип отношений" и "Отношения элементов". Описание общих планов работ для подготовки классов объектов предполагает возможность наличия

той или иной специфики, которая может быть связана с тем, какой именно тип изделия из класса является объектом работы. Для описания такой специфики используется понятие "Объектная специфика".

Шестая группа понятий "Требования к исполнителям работ" используется для описания требований к формированию состава исполнителей работ. Понятие "Профиль исполнителя" позволяет описывать требования к исполнителям работ, а именно специальности и допуски к работам на типах обо-

рудования. Количественные требования по составу исполнителей с необходимыми профилями описываются с помощью понятия "Состав исполнителей".

В седьмой группе "Персонал" определяются понятия для описания организационной структуры (понятие "Отдел") и штатного персонала ЭП космодрома (понятие "Сотрудник"). Понятие "Профиль сотрудника" определяет необходимые данные для сопоставления сотруднику того множества работ, на которые он может быть назначен.

Подсистема расчета планов и графиков работ

Подсистема РПГ обеспечивает возможности стратегического и оперативного планирования. Под стратегическим планированием понимается расчет графиков работ тех КР, которые должны начаться в будущем. Под оперативным планированием понимается коррекция графиков работ уже выполняемых КР в случаях возникновения непредвиденных событий. В обоих случаях расчет графиков подразумевает расчет допустимых назначений исполнителей на работы с учетом всех требований и ограничений, описанных в БЗ.

Основной целью стратегического планирования является согласование сроков проведения КР. Суть данной задачи с точки зрения ЭП состоит в сле-

дующем. При планировании каждой новой миссии в планы работ ЭП добавляются те КР, которые ЭП должны обеспечивать в процессе выполнения данной миссии (рис. 3). При этом указываются предварительные сроки проведения этих КР исходя из планируемых сроков поставки составных частей РКН на космодром и пуска РКН, а также в соответствии с предварительными расчетами сроков проведения других КР другими ЭП. Задачей каждого ЭП на данной стадии планирования является оценка возможности выполнения КР в указанные сроки. Это может оказаться невозможным, если на эти же интервалы времени уже имеются запланированные КР, и персонал ЭП уже имеет назначения на работы из этих КР. В таких случаях ЭП должны определить коррекцию сроков проведения новых КР исходя из своих возможностей. В свою очередь, эти решения очевидным образом влияют на сроки проведения других КР другими ЭП и всей миссии в целом. Таким образом, процесс планирования новых миссий может иметь итеративный характер, в ходе которого может происходить последовательное уточнение и согласование сроков проведения миссии и отдельных КР до тех пор, пока ЭП не подтвердят возможность проведения КР в эти сроки.

График работ, рассчитываемый на стадии стратегического планирования, иначе называется мас-

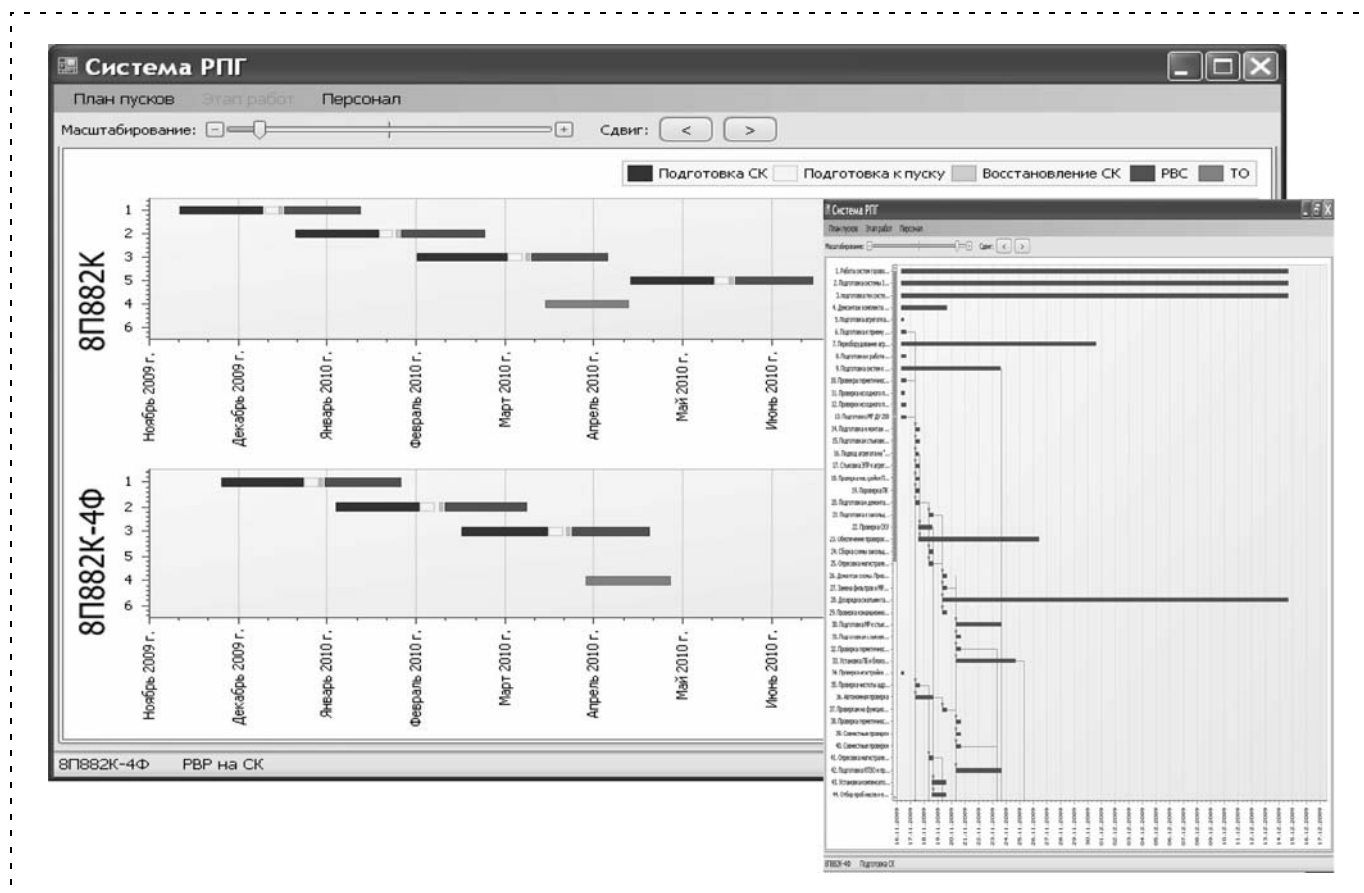


Рис. 3. Примеры представления планов и графиков работ

тер-планом. Сроки проведения работ и назначения исполнителей в мастер-плане имеют относительный характер. В процессе выполнения КР эти решения могут неоднократно изменяться в связи с возникновением различного рода непредвиденных событий. Такая коррекция графиков работ является сутью задачи оперативного планирования. Для решения этой задачи подсистема РПГ предоставляет пользователю набор функциональных возможностей, которые позволяют фиксировать текущую ситуацию и выполнять необходимый перерасчет графиков работ. Описание текущей ситуации сводится к регистрации таких фактов, как время начала и окончания работ, изменение возможного времени начала работы в силу каких-то причин, ожидаемый срок завершения выполняемой работы, интервал времени, когда сотрудник по каким-то причинам не может принимать участие в работах. По результатам зарегистрированных фактов выполняется коррекция графика оставшихся работ КР и перераспределение ресурсов между работами. Результаты оперативного планирования можно рассматривать как поддержку принятия решений о том, какие работы "желательно начать сегодня". Это решение принимается исходя из того, чтобы закончить выполнение всего КР к заданному сроку. Возможности оперативного планирования, предоставляемые подсистемой РПГ, могут использоваться в режиме, удобном для пользователя, например, ежедневно — так, как это происходит в реальной практике, или через несколько дней, если это позволяет текущая ситуация.

Подсистема РПГ обеспечивает различные варианты расчета графиков работ на основе выбора следующих опций: 1) расчет графика работ от начала или от конца плана; 2) возможность перераспределения исполнителей работ, если расчет графика работ выполняется на интервале времени, на котором уже имеются рассчитанные графики работ других КР; 3) одновременный расчет графиков работ для нескольких КР, сроки выполнения которых пересекаются. При этом расчет графиков работ может выполняться как в автоматическом режиме, так и с участием пользователя. Основы алгоритма, используемого для расчета мастер-планов и коррекции графиков работ, описываются в следующем разделе статьи.

Классы агентов и алгоритмы расчета и коррекции графиков работ

Метод решения задач стратегического и оперативного планирования, реализованный в подсистеме РПГ, является развитием эвристических методов решения задач планирования [2]. Метод основан на использовании многоагентной системы (МАС), состоящей из агентов двух классов и дополнительного агента менеджера. Агенты первого класса сопоставляются тем КР, для которых выполняется расчет графика работ. Агенты этого класса обладают

следующими данными. Они имеют полное описание плана выполнения работ соответствующего КР и детальное описание каждой работы. Эти данные агенты КР загружают из БЗ. Кроме этого, эти агенты имеют оперативные данные относительно каждой работы, формируемые в процессе расчета графика, а именно, сроки выполнения работы и ее состояние — *не назначена, назначена, исполняется, выполнена*. Работа считается назначенной, если для ее выполнения назначены исполнители в необходимом объеме с учетом всех ограничений и требований. В противном случае работа считается не назначенной. Агенты второго класса сопоставляются сотрудникам штатного персонала. Эти агенты также обладают данными, которые загружаются из БЗ, — данными о сотруднике, а также оперативными данными, которые формируются в процессе расчета графика, а именно — на какие работы сотрудник имеет назначения. Агент-менеджер осуществляет координацию работы всех остальных агентов и обладает для этого только оперативными данными.

В обобщенном виде суть метода решения задачи планирования можно описать следующим образом. До начала расчета графика работ на основе заданных сроков выполнения КР и плана рассчитываются исходные сроки выполнения работ без назначения исполнителей. В процессе расчета графика работ в связи с поиском допустимого назначения исполнителей эти сроки будут соответствующим образом изменяться. Расчет графика предполагает выполнение последовательности шагов, на каждом из которых делается попытка назначения исполнителей для какой-то одной выбираемой работы *A*. Если попытка оказалась безуспешной, для работы рассчитывается новый возможный срок ее выполнения, и на этом текущий шаг заканчивается. Попытка назначения работы *A* для новых сроков ее выполнения осуществляется на другом, не обязательно следующем, шаге. В процессе поиска исполнителей на работу *A* осуществляется взаимодействие агента-менеджера с агентами сотрудников на основе протокола взаимодействия, прототипом которого является широко используемый в различных МАС протокол CNP (Contract Net Protocol) [3].

Более детально процесс расчета графика и взаимодействие агентов системы в случае стратегического планирования представлен ниже. В этом описании рассматривается вариант расчета графика для нескольких КР одновременно, в режиме "от начала планов" и с возможностью перераспределения сотрудников.

Шаг 1. Определение множества работ АСТ, которые могут быть назначены на очередном шаге.

Агент каждого КР определяет множество работ *АСТ(КР)*, которые могут быть назначены на данном шаге, и сообщает это множество работ агенту-менеджеру. В это множество выбираются те работы, для которых все предшествующие работы уже назначены.

Шаг 2. Выбор работы A для назначения на текущем шаге.

Этот выбор выполняется агентом-менеджером из списка работ АСТ, являющегося объединением всех полученных списков работ АСТ(КР). Для выбора работы используется несколько правил (критериев), основное из которых сравнивает времена начала работ и резервы времени работ. Резерв времени работы $RT(A)$ определяется по формуле

$$RT(A) = \min\{start(A_j) - finish(A) + RT(A_j)\},$$

где A_j — работы, выполняемые после работы A ; $start(A_j)$ и $finish(A)$ — время начала и окончания работы A_j ; $RT(A_j)$ — резерв времени работы A_j . Резерв времени "последних" работ в плане определяется по формуле

$$RT(A) = finish(KP) - finish(A),$$

где $finish(KP)$ — время окончания КР.

На основании этого правила выбирается наиболее ранняя работа A с меньшим резервом времени $RT(A)$, если в списке работ АСТ не существует работы B такой, что

$$start(A) \leq start(B) < finish(A)$$

и

$$\min(RT(A), RT^*(B)) < RT^*(A),$$

где $RT^*(B)$ [$RT^*(A)$] — резерв времени работы B [A] после изменения сроков ее выполнения, при которых она выполняется после работы A [B]. Физический смысл этого условия можно пояснить следующим образом. Если работы A и B имеют пересечение во времени, они могут конкурировать между собой в плане назначения одних и тех же сотрудников. Если число таких сотрудников в штате ЭП ограничено и не позволяет одновременно выполнять работы A и B , возможны два варианта — либо работа A должна выполняться после работы B , либо наоборот — работа B после работы A . Сдвиг сроков каждой из этих работ уменьшает ее резерв времени. Поэтому из этих двух вариантов выбирается тот, который имеет наилучшие последствия для назначения последующих работ. В данном случае работа B будет иметь приоритет по отношению к работе A , если в результате сдвига сроков выполнения работы B ее резерв времени $RT^*(B)$ станет меньше, чем резерв времени $RT^*(A)$ работы A в случае сдвига работы A .

Шаг 3. Сбор предложений по выполнению работы A.

Агент каждого сотрудника сопоставляет его описание с требованиями работы A . Если сотрудник удовлетворяет требованиям работы, агент проверяет его занятость на планируемом интервале времени выполнения работы A . Для этого выполняется поиск списка работ $List$, на которые сотрудник уже назначен на этом интервале времени. Если участие

сотрудника в работе A в совокупности с его назначениями на множество работ $List$ не влечет нарушения ограничений, агент дает безусловное предложение. В противном случае агент рассматривает возможность подачи условного предложения. Предложение является условным, если участие сотрудника в работе A является возможным при условии отмены его назначений на работы из списка $List$, менее приоритетные по сравнению с работой A . Приоритетность работ рассчитывается на основании правила, используемого на шаге 2 при выборе работы для назначения.

Шаг 4. Выбор предложений и назначение сотрудников на работу A.

Агент-менеджер выполняет анализ поданных предложений. Если число предложений меньше требуемого числа исполнителей, назначение не происходит, и делается вывод о необходимости сдвига сроков выполнения работы A . Если число предложений равно требуемому числу исполнителей, выбираются все предложения. Если число предложений превышает требуемое число исполнителей, выбираются предложения агентов сотрудников, имеющих меньше возможностей по участию в любых прочих работах. Такая возможность определяется числом различных работ, в которых сотрудник может принимать участие. Использование этой эвристики оставляет наибольшие шансы для назначения последующих работ без пересмотра сроков их выполнения.

Если назначение работы является возможным, агент-менеджер принимает решения о назначениях сотрудников на основе выбранных предложений и сообщает об этом агентам этих сотрудников и агентам КР. Если при этом назначен сотрудник, предложение участия которого является условным, его агент отказывается от назначений на соответствующие работы и сообщает об этом агентам соответствующих КР.

Шаг 5. Обработка результатов назначения работы A.

Обработка результатов назначения работы A выполняется агентами КР на основе информации, полученной от агента-менеджера. При этом агент КР либо уточняет список работ АСТ(КР), которые можно назначать на следующем шаге, либо рассчитывает новый срок выполнения не назначенной работы. Для расчета нового срока агент КР собирает предложения агентов сотрудников по аналогии с тем, как это делает агент-менеджер при попытке назначения сотрудников на выбранную работу на шаге 3. Отличие состоит лишь в содержании предложений, которые дают агенты сотрудников. Агент каждого сотрудника H , который удовлетворяет требованиям работы, определяет момент времени $t(H) > start(A)$, начиная с которого сотрудник может участвовать в работе A . Из числа полученных предложений агент КР выбирает самый ранний момент времени $t(H)$ и определяет его в качестве нового

планируемого срока начала работы *A*. В связи с этим проверяются и при необходимости пересчитываются планируемые сроки всех работ, выполняемых в соответствии с планом КР после работы *A*. По окончании обработки результатов назначения агенты КР сообщают агенту менеджеру уточненные списки работ *ACT(KP)*, которые могут назначаться на следующем шаге. После чего агент-менеджер продолжает расчет графика работ, начиная с шага 2.

Оперативное планирование изначально отличается от стратегического планирования тем, что уже имеющиеся графики работ, либо рассчитанные в результате стратегического планирования, либо скорректированные в результате предыдущего оперативного планирования. Очередное оперативное планирование начинается с описания текущей ситуации, для чего выполняется регистрация фактов. В результате этого в графике работ могут возникать конфликты двух типов: 1) нарушения технологического порядка выполнения работ; 2) нарушение ограничений назначения сотрудников на работы. Выявление и устранение конфликтов выполняется в три этапа.

На первом этапе агенты КР выявляют работы, сроки выполнения которых влекут нарушения технологического порядка выполнения работ, и пересчитывают сроки выполнения таких работ для устранения конфликтов этого типа. На втором этапе агенты сотрудников выявляют и устраняют конфликты второго типа. Исходными данными для этого является список работ, у которых были изменены сроки выполнения работ. Суть конфликтов этого типа состоит в том, что в результате пересчета сроков выполнения работ на определенных интервалах времени сотрудник может получить недопустимый список назначений на несколько работ. Для устранения таких конфликтов агент сотрудника отказывается от ряда назначений на менее приоритетные работы. Приоритет работ определяется на основании тех же правил, которые используются на шаге 2 при выборе работы для назначения. На третьем этапе агенты КР выявляют работы, для которых агентами сотрудников были удалены назначения, и удаляют оставшиеся назначения сотрудников на эти работы.

Таким образом, в результате выявления и устранения конфликтов в графике работ некоторые из них могут вновь стать не назначенными. Если таковых работ нет, пересчет графика работ не требуется. В противном случае выполняется коррекция графика работ с помощью описанного выше алгоритма стратегического планирования.

Следует отметить, что возможности и результаты оперативного планирования можно рассматривать (использовать) как средство поддержки принятия решений для разрешения типовых "проблемных ситуаций", возникающих на практике и имеющих организационные аспекты. Одна из таких ситуаций связана с контролем утвержденных сроков выпол-

нения КР. Пересчет графика работ может показывать нарушение утвержденных сроков. В этом случае возможны различные организационные решения — согласование изменений сроков выполнения КР, использование сверхурочного времени, перераспределение сотрудников между различными КР. Вторая типовая ситуация связана с решением о том, какие работы следует начинать в первую очередь. Суть этой задачи состоит в следующем. Имеется несколько работ, которые уже могут быть начаты в соответствии с технологическим порядком выполнения работ, но отсутствие свободных сотрудников не позволяет начать выполнение всех этих работ одновременно. Следовательно, возникает вопрос о том, какие из этих работ имеют более высокий приоритет. Ответ на этот вопрос дают результаты оперативного планирования. Однако руководитель работ по каким-то причинам может иметь иное решение. В этом случае подтвердить возможность такого решения или, наоборот, показать его отрицательные последствия можно путем расчета графика работ, приняв в качестве условия данное решение и сравнив сроки выполнения КР в одном и другом случае.

Заключение

В качестве заключения следует отметить основные свойства, характеризующие возможности ядра разработанного программного комплекса — многоагентной системы. Во-первых, следует указать возможные области ее применения. Описанная в данной статье МАС является развитием предшествующей версии, которая ранее была разработана для решения задач управления проектами в области микроэлектроники [4]. Прототип данной МАС также был использован в качестве основы приложения, предназначенного для решения задач транспортной логистики [5]. В настоящее время разрабатывается новая модификация этой МАС, предназначенная для решения задач в области производственной логистики. Эта модификация учитывает специфику, которая имеется в задачах планирования производственных процессов по сравнению с задачей планирования, описанной в данной статье. Существенные отличия, главным образом, заключаются в следующем. Прообразами КР в производственной логистике являются технологические процессы. В отличие от КР план работ в технологических процессах имеет линейный порядок. В плане КР работы частично упорядочены. Второе существенное отличие касается требований работ, определяющих порядок назначения ресурсов на работы. В рассмотренной задаче различные работы имеют различное число типов и единиц требуемых ресурсов. В случае производственной логистики эти требования состоят в том, что для выполнения работы, как правило, требуется один рабочий и один станок. Указанные свойства позволяют сравнить пространства поиска

решений и оценить возможное быстроедействие работы алгоритма в задачах производственной логистики. Можно предположить, что сложность решения задач планирования в области производственной логистики, по крайней мере, не превышает сложность решения рассмотренной задачи.

Оценка быстрогодействия систем планирования является критической характеристикой возможности их использования в реальной практике. В отношении описанной МАС ее быстроедействие было проверено как при решении тестовых задач [5], так и в реальной практике. В частности, расчет графиков КР, состоящих из приблизительно 200 работ, предполагающий выбор назначений из множества, имеющего примерно 250 сотрудников, занимает меньше минуты на персональном компьютере PENTIUM IV 2800MHz с оперативной памятью объемом 1024Mb.

1. **Сетевой** информационный ресурс о космонавтике СССР и России. URL: <http://www.kosmos.info/>
2. **Kolisch R., Hartmann S.** Heuristic Algorithms for Solving the RCPS Problem // Classification and Computational Analysis. Report N 469. Institut fuer Production und Logistic Christian-Albrecht University of Keil, Germany. Also published in Handbook on Recent Advances in Project Scheduling (Ed. J. Weglarz), Kluwer Academic Publishers, 1999.
3. **Smith R.** The contract net protocol: high level communication and control in distributed problem solved // IEEE Transactions on Computers. 1980. 29: 1104—1113.
4. **Gorodetsky V., Ermolaev V., Matzke W.-E., Jentsch E., Karsaev O., Keberle N., Samoilov V.** Agent-based Framework for Simulation and Support of Dynamic Engineering Design Processes in PSI / In M. Pechoucek, P Petta, L. Varga (Eds.) // Multi-Agent Systems and Applications IV. Lecture Notes in Artificial Intelligence, Springer, 2005. V. 3690. P. 511—520.
5. **Gorodetsky V., Karsaev O., Konyushiy V.** Multi Agent System for Resource Allocation and Scheduling. Proceedings of the Third International // Central and Eastern European Conference on Multi-Agent Systems (CEEMAS 2003) / V. Marik, J. Muller, M. Pechoucek (Editors). Lecture Notes in Artificial Intelligence, Springer-Verlag, V. 2691. P. 236—246.

УДК 004.4'22(07)

А. В. Жарковский, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,

А. А. Лямкин, канд. техн. наук, доц.,

Т. Ф. Тревогода, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет "ЛЭТИ"

tat.trevogoda@yandex.ru

Автоматизация процесса отладки программных комплексов управления сложными техническими системами

Предлагается информационная модель и структура средств автоматизированной отладки программных комплексов управления сложными техническими системами, приводится алгоритм поиска и локализации ошибок при отладке программных средств.

Ключевые слова: информационная модель, структура, программный комплекс, формуляр, алгоритм

Автоматизация тестирования программных комплексов

Цели функционирования сложных технических систем (СТС) достигаются только благодаря управлению. Для управления системами служит, как правило, не одна, а целый комплекс программ, называемый функциональным программным обеспечением (ФПО). Эффективность функционирования сложной системы зависит, главным образом, от качества программных средств управления. Самым длительным и дорогостоящим этапом создания ФПО

является его отладка. Видимо, повысить качество и снизить затраты на создание программного комплекса можно, как и в других областях, лишь за счет автоматизации процесса его отладки.

Основным методом, используемым при отладке ФПО, является метод тестирования [1]. Он предполагает формирование входного тестового набора данных (ТНД), который подается на вход ФПО, и некоторого эталона. Затем решение (реакция, выход) ФПО (выходной ТНД) сравнивается с эталонным решением. Несовпадение решений не только говорит о наличии ошибки, но и позволяет судить даже о месте ее возникновения. Сложность и обусловленная этим трудоемкость процесса тестирования связаны не только с поиском ошибок и места их возникновения, но и с формированием входных и выходных тестов.

Ошибки ФПО обусловлены, главным образом, несогласованностью частных технических заданий (ТЗ) на отдельные программы и разным пониманием Заказчиком и Исполнителем функций ФПО из-за вербальной формулировки общего ТЗ на его создание. Это выясняется в процессе испытаний. При несоответствии ФПО техническому заданию (при неправильной работе, отличии реальных количественных показателей от требуемых и др.) следует доработка (доводка) ФПО, заключающаяся в устранении найденных ошибок, проверочной отладке и новом испытании. Это — весьма длительный и трудоемкий процесс, который нередко заканчивается провалом проекта.

Весьма распространенным примером СТС являются самоходные зенитные ракетные и (или) артиллерийские комплексы. Они служат для уничто-

жения различных целей при отражении воздушного налета противника и всегда функционируют в условиях противодействия. При этом можно считать, что независимо от особенностей различных типов зенитных комплексов (ЗК) их ФПО решает, по крайней мере, четыре задачи: преобразование координат, определение параметров движения целей, ранжирование (определение степени опасности) целей и целераспределение—целеуказание (задание пространственного положения средств сопровождения и наведения на выбранную для уничтожения цель). Для решения каждой из этих задач служат отдельные программы, выполняемые последовательно и все вместе образующие ФПО.

При испытаниях (и при отладке тоже) ФПО тестируется в соответствии с представлениями Заказчика о том, как оно должно реагировать на ту или иную складывающуюся тактическую ситуацию. Заказчик обычно оперирует с тактическими ситуациями, которые описываются в неподвижной декартовой системе координат, а входной тест должен содержать данные в связанной сферической системе координат, так как именно в таком виде они поступают на вход ФПО от средств технического зрения.

Выходной тест формируется эталоном. Обычно в качестве эталона выступает человек (эксперт в данной области). Однако эксперт может судить о правильности выработанных ФПО решений лишь в самых простых случаях, которые могут быть весьма далеки от реальных ситуаций. Здесь следует обратить внимание на то, что на начальной стадии — стадии концептуального проектирования — всегда создается модель функционирования СТС, на которой отрабатываются правила боевого использования разнообразных средств и оценивается эффективность СТС в различных тактических ситуациях. Это означает, что частью такой модели неизбежно должна выступать модель будущего реального ФПО.

Именно эта модель и может быть использована в качестве эталона, как замена эксперта. Такой метод тестирования можно назвать тестированием с эталонной моделью.

Средства автоматизированной отладки программных комплексов

Структура средств автоматизированной отладки ФПО ЗК представлена на рис. 1, где обозначено: ТЭВМ — технологический и БЭВМ — бортовой компьютеры, ВА — стандартная внешняя аппаратура, ОП — оператор. Ведущей является ТЭВМ, в качестве которой может использоваться достаточно мощный персональный компьютер.

ЭВМ всегда отличается от ТЭВМ элементной базой, тактовой частотой, операционной системой, языком программирования и другими характеристиками. Для обмена информацией между операционными системами (OS) и программами обеих машин необходимо аппаратное или программное согласование интерфейсов (SI).

В БЭВМ размещается проверяемое реальное ФПО (РФПО), а в ТЭВМ — модель ФПО (МФПО). В ТЭВМ дополнительно размещаются: Г — программный генератор входных ТНД, О — программа поиска и локализации ошибок (программа отладки) и SI — модули согласования интерфейсов обеих ЭВМ.

Реальное и модельное ФПО всегда подразделены на одинаковые функциональные программы, которые определяются решаемыми задачами. В ФПО входят: К — программа преобразования координат, P — программа расчета параметров движения целей, R — программа ранжирования и U — программа целераспределения—целеуказания. Выходы всех программ (формуляры обмена информацией) обозначены, как F с расширением по имени программы.

Генератор входных ТНД включает в себя генератор координат и обобщенную модель средств технического зрения. Генератор предназначен для формирования координат, скоростей и направлений движения объектов противника на основе заданной тактической ситуации в декартовой системе координат (например, на основе обобщенных параметров тактической ситуации [2]), а обобщенная модель средства технического зрения служит для пересчета координат целей из декартовой системы координат в сферическую. Генератор работает в режимах разового и непрерывного формирования координат.

Оператор вводит параметры тактической ситуации, и по его

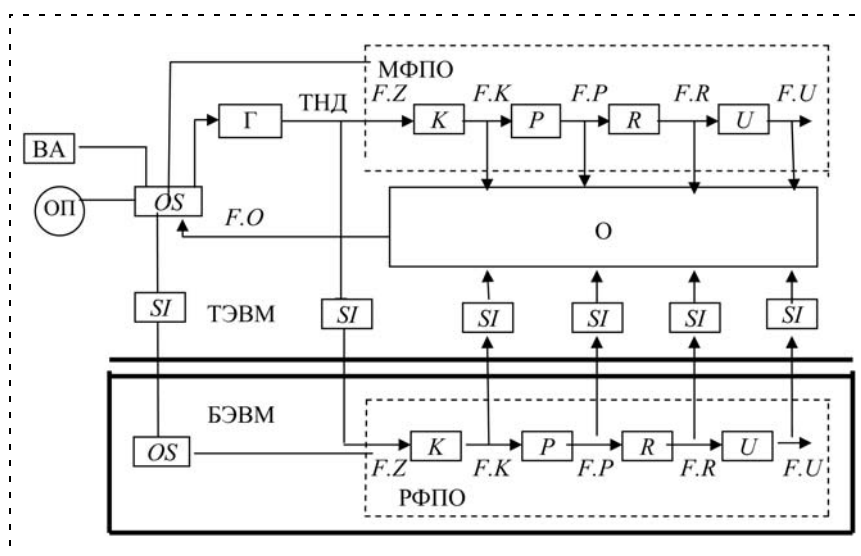


Рис. 1. Структура комплекса автоматизированной отладки ПК

сигналу формируется либо одиночный входной ТНД либо серия входных ТНД, которые соответствуют развивающейся тактической ситуации. В последнем случае ТНД формируются с реальной частотой опроса средств технического зрения. Сформированный ТНД одновременно подается на входы МФПО и РФПО. По сигналу окончания работы программы U реального ФПО начинается поиск и локализация ошибок программного комплекса.

Информационная модель ФПО

Информационная модель ФПО представляет собой совокупность информационных связей между отдельными программами и устройствами ЗК. Эти связи могут быть описаны с использованием объектно-признакового языка [3] в виде формуляров обмена (F).

Так, формуляр средства технического зрения имеет вид

$$F.Z [LC, N_C, D, K, M, S, PR:\{B, N\}],$$

где LC — число целей (объектов); N_C — порядковый номер цели в нумерации данного средства технического зрения; D — наклонная дальность до цели; K — курсовой угол цели; M — угол места цели; S — скорость цели; $PR:\{B, N\}$ — признак размера цели (B — цель большеразмерная, N — цель малоразмерная).

Выходной формуляр программы преобразования имеет вид

$$F.P [LC, N_C, X, Y, Z],$$

где X, Y, Z — координаты цели в декартовой системе координат.

Формуляр программы расчета параметров движения целей имеет вид

$$F.K [LC, N_C, EZ, EY, DG, KP, TP],$$

где EZ и EY — углы, характеризующие направление движения цели, соответственно, в горизонтальной и вертикальной плоскостях; DG — горизонтальная дальность; KP — курсовой параметр цели; TP — подлетное время цели к заданной точке (области).

Формуляр ранжирования

$$F.R [LC, N_C, RC]$$

включает в себя RC — ранг цели.

Формуляр программы целераспределения — целеуказания может быть описан как

$$F.U [N_S, UZ, UY],$$

где N_S — номер (имя) ориентируемого средства ЗК (например, инфракрасное или радиолокационное устройство сопровождения); UZ и UY — углы

ориентация этого средства, соответственно, в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

В приведенных формулярах содержатся значения лишь тех переменных, которые вычисляются указанными программами и используются в других программах. Но это не означает, что всякая последующая программа использует только выходную информацию предыдущей программы. Она может использовать выходную информацию любых предшествующих по времени выполнения программ. Например, в программе ранжирования используются KP и TP из $F.P$, а также D и S из $F.Z$.

Алгоритм поиска и локализации ошибок ФПО

Отладка сводится к обнаружению ошибок в работе ФПО и определению (локализации) места их возникновения. Алгоритм поиска и локализации ошибок (алгоритм отладки) в строчной форме записи приведен на рис. 2. Алгоритм реализуется программой O (см. рис.1).

В блоке исходных данных алгоритма записываются выходные формуляры всех программ РФПО с расширением R и формуляры МФПО с расширением M . Здесь также указываются константы, определяющие допустимое расхождение в вычислениях одноименными программами РФПО и МФПО угловых (DU) и линейных (DL) величин.

В начале алгоритма сравниваются формуляры $F.U$, а затем последовательно сравниваются формуляры всех предыдущих программ вплоть до $F.P$. Если в вычислении всех переменных формуляров $F.U$ нет ошибки (разность одноименных числовых переменных не превышает допустимой погрешности, а одноименные нечисловые переменные совпадают), значит, и ошибка в работе всего РФПО отсутствует. Если есть ошибка в вычислении какой-либо переменной, то переходят к сравнению предшествующих формуляров ($F.R$). Их равенство свидетельствует о том, что ошибка в вычислении именно такой-то переменной произошла в программе U , а неравенство говорит об ошибке в одной из предшествующих программ. Выявленная ошибка устраняется путем коррекции программы U , и тестирование продолжается.

Когда в выходном формуляре какой-либо программы присутствуют данные, относящиеся к нескольким целям, то сравниваются формуляры относительно каждой из них. Это требует циклического перебора всех целей.

Для уменьшения размерности приведенного алгоритма подробное сравнение всех переменных формуляров $F.K$ обозначено как сравнение самих формуляров $F.KM [...] = F.KR [...]$, а $F.P$ — как $F.PM [...] = F.PR [...]$. Алгоритм сравнения переменных этих формуляров аналогичен приведенному выше алгоритму сравнения переменных формуляра $F.U$.

F.UM [*N_S.M*, *UZ.M*, *UY.M*]; *F.UR* [*N_S.R*, *UZ.R*, *UY.R*]; *DU*, *DL*;
F.RM [*LC.M*, *N_C.M*, *RC.M*]; *F.RR* [*LC.R*, *N_C.R*, *RC.R*];
F.KM [*LC.M*, *N_C.M*, *EZ.M*, *EY.M*, *DG.M*, *KP.M*, *TP.M*];
F.KR [*LC.R*, *N_C.R*, *EZ.R*, *EY.R*, *DG.R*, *KP.R*, *TP.R*];
F.PM [*LC.M*, *N_C.M*, *X.M*, *Y.M*, *Z.M*]; *F.PR* [*LC.R*, *N_C.R*, *X.R*, *Y.R*, *Z.R*]

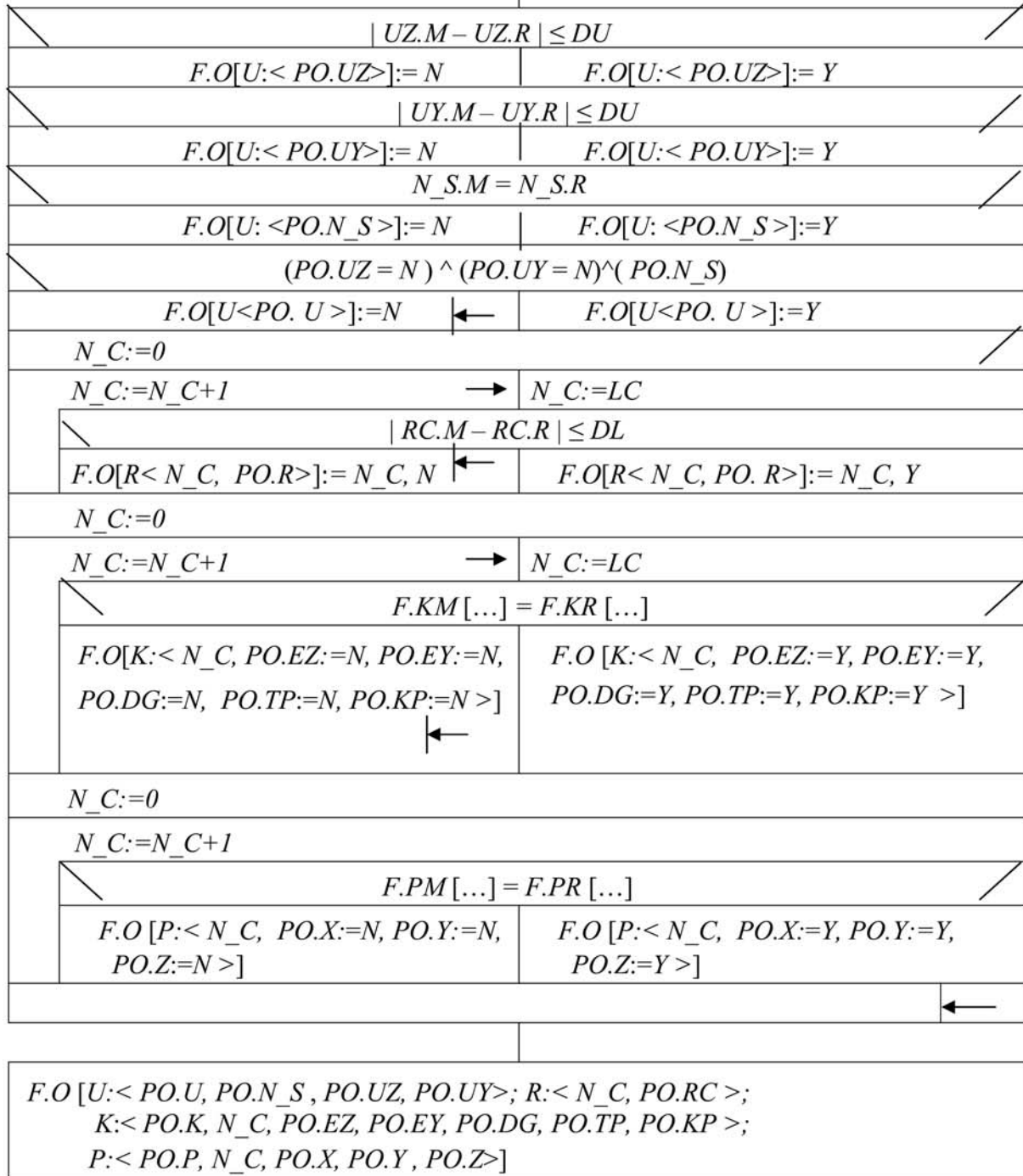


Рис. 2. Алгоритм поиска и локализации ошибок ФПО

Выявленные ошибки в работе отдельных программ с точностью до имен переменных, в вычислении которых обнаружена ошибка, указываются в выходном формуляре алгоритма в виде признака ошибки (PO.) с расширением по имени переменной.

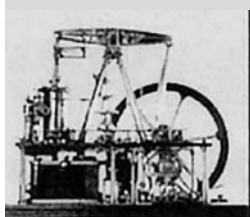
Приведенные материалы показывают возможность автоматизации процесса отладки ФПО зенитных комплексов как одного из примеров СТС, что позволит повысить качество и сократить сроки их разработки. Предложенный подход также может быть использован при построении средств отладки

любых других программных комплексов, в которых осуществляется последовательное выполнение программ.

Список литературы

1. **Липаев В. В.** Тестирование программ. М.: Радио и связь, 1986.
2. **Лямкин А. А.** Концептуальное проектирование средств управления подвижных объектов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ, 2006.
3. **Лямкин А. А., Жарковский А. В., Микуленко Н. П., Тревогода Т. Ф.** Модели подвижных объектов при концептуальном проектировании // Мехатроника. 2007. № 11. С. 2—6.

ИНФОРМАЦИЯ



Ежегодная специализированная выставка оборудования и технологий для АСУ ТП и встраиваемых систем

2011: МОСКВА, ЭКСПОЦЕНТР 21—23 СЕНТЯБРЯ

Автоматизация Промышленного Предприятия

- АСУ и КИС масштаба предприятия (MRP, ERP, MES и др.)
- Системы связи и телекоммуникаций для промышленных объектов
- Управление и анализ финансово-хозяйственной деятельности
- АС инженерных сетей, энергосбережение
- Мониторинг территорий, зданий и помещений, "интеллектуальные" здания
- Компьютерные периферийные устройства (промышленные клавиатуры и указывающие устройства)

Автоматизация Технологических Процессов

- SCADA-системы. Системы реального времени. Системы автоматизированного проектирования
- Промышленные компьютеры и сетевое оборудование
- Автоматические линии, автоматизированные робототехнические комплексы, системы с ЧПУ
- АС контроля, диагностики, испытаний. КИП и А
- Контроллеры, исполнительные устройства, приводы
- Тренажеры операторов АСУ
- Беспроводные технологии

Измерительные технологии и метрологическое обеспечение

- Контрольно-измерительные приборы
- Оборудование для испытаний, диагностики и неразрушающего контроля
- Аналитическое и лабораторное оборудование

Системная интеграция и консалтинг

- Автоматизация добычи нефти и газа
- Автоматизация на транспорте
- Решения для интеллектуальных зданий
- IT-консалтинг
- Информационно-аналитические системы

Автоматизация зданий (оборудование, технологии и ПО) для:

- повышения уровня комфортности;
- оптимизации ресурсов и эксплуатационных затрат;
- эффективного функционирования инженерных сетей в здании;
- безопасности человека в здании.

Бортовые и встраиваемые системы

- Компьютеры ответственных применений
- Бортовые вычислительные системы
- Панельные компьютеры для систем ЧМИ (НМИ)
- Системы связи и навигации для мобильных и ответственных применений
- Встраиваемые ОС, CPB

Подробную информацию о выставке ПТА-2011 см. на сайте
<http://www.pta-expo.ru/moscow/tematika.htm>



ЖУРНАЛ В ЖУРНАЛЕ



Управление и информатика в авиакосмических и морских системах

№ 4 (121)
АПРЕЛЬ
2011

Главный редактор:

ЛЕБЕДЕВ Г. Н.

Редакционная коллегия:

АЛЕКСЕЕВ В. В.
БЕЛОКОНОВ И. В.
БУКОВ В. Н.
ВАСИЛЬЕВ В. И.
ГОДУНОВ В. А.
ГУРЕВИЧ О. С.
ГУРСКИЙ Б. Г.
ЕФИМОВ В. В.
ЗАЙЦЕВ А. В.
КРЫЖАНОВСКИЙ Г. А.
НЕСТЕРОВ В. А.
ОХТИЛЕВ М. Ю.
ПАНКРАТОВ В. М.
РАСПОПОВ В. Я.
САБО Ю. И.
СТЕПАНОВ О. А.
СОЛДАТКИН В. М.
ТЕРЯЕВ Е. Д.
ФИЛИМОНОВ Н. Б.
ШИРЯЕВ В. И.
ШКОЛИН В. П.

Редакция:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.
ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.
ЧУГУНОВА А. В.

СОДЕРЖАНИЕ

Сапунков Я. Г., Молоденков А. В.

Исследование особого режима управления в задаче оптимального разворота произвольного твердого тела (космического аппарата) 67

Девятисильный А. С., Числов К. А.

Модель позиционно корректируемой двухкомпонентной гравиинерциальной навигационной системы на основе интерпретации принципа Д'Аламбера 71

Грязин Д. Г., Скалон А. И., Величко О. О., Чекмарев А. Б.

Опыт аттендации трехосного поворотного стенда фирмы Acustronic 75

Я. Г. Сапунков, канд. физ.-мат. наук, доц.,
А. В. Молоденков, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
 Институт проблем точной механики
 и управления РАН, г. Саратов
 iptmuran@san.ru

Исследование особого режима управления в задаче оптимального разворота произвольного твердого тела (космического аппарата)*

Рассматривается задача оптимального разворота космического аппарата как твердого тела произвольной динамической конфигурации при произвольных граничных условиях по угловому положению и угловой скорости космического аппарата в кватернионной постановке. В качестве критерия оптимальности используется функционал, который объединяет время и интегральную величину модуля вектора управления, затраченных на разворот космического аппарата. Приводится исследование особого режима управления космического аппарата.

Ключевые слова: оптимальное управление, особый режим, космический аппарат, произвольное твердое тело

Введение. Построение управления пространственной переориентацией космического аппарата (КА) как твердого тела в традиционной постановке включает задачи программного углового движения (разворота), программного управления и поиска управления, стабилизирующего программу углового движения в малом. Задача расчета программного углового движения и реализующего его управления во многих случаях решается с помощью методов теории оптимального управления. Точное аналитическое решение этой задачи для наиболее часто используемых функционалов оптимизации при произвольных граничных условиях по угловому положению и угловой скорости КА не найдено даже в случае сферической симметрии КА, не говоря уже о его произвольной динамической конфигурации. Известны лишь некоторые частные случаи решения задачи (см., например, [1–6]). В общем случае приходится рассчитывать только на приближенные численные методы, при этом особые режимы управления не рассматриваются [2] (хотя для ряда функционалов оптимизации они возможны). Поэтому аналитическое исследование особых режимов управления в задаче оптимального разворота КА является актуальным.

Постановка задачи имеет традиционную форму, управление положено в виде функции, кусочно-непрерывной и ограниченной по модулю. Функционал качества в задаче представляет собой линейную свертку двух критериев: времени и интегральной

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 05-01-00347.)

величины модуля вектора управляющего воздействия, затраченных на разворот КА; при этом каждый из критериев умножен на свой весовой коэффициент. На основании принципа максимума Л. С. Понтрягина получаются выражения для структуры оптимального управления, функции Гамильтона—Понтрягина и сопряженной системы уравнений для исходной задачи. Особым режимом управления принято называть ситуацию, когда гамильтониан явным образом не зависит от управления, тогда переходят к исследованию производных разных порядков функции Гамильтона—Понтрягина, фазовых и сопряженных переменных задачи. С использованием этого подхода подтверждено, что в зависимости от соотношения между весовыми коэффициентами функционала качества, граничными условиями задачи и заданной величиной, ограничивающей модуль вектора управления КА, особый режим в задаче возможен. Представлено его аналитическое исследование. При этом, в отличие от случая сферической симметрии КА [7], особый режим управления не носит изолированного характера, т. е. возможен переход от участков активного и свободного движения КА к участкам особого режима управления и обратно.

Статья продолжает исследования, начатые в [7].

1. Постановка задачи. Движение КА как твердого тела произвольной динамической конфигурации вокруг центра масс описывается следующим уравнением [2]:

$$2\dot{L} = L \circ w; \quad (1)$$

$$\dot{w} = R^{-1}M - R^{-1}[w, Rw]; \quad (2)$$

$$R = \begin{bmatrix} I_1 & 0 & 0 \\ 0 & I_2 & 0 \\ 0 & 0 & I_3 \end{bmatrix},$$

где $L(t) = l_0(t) + l_1(t)i_1 + l_2(t)i_2 + l_3(t)i_3$ (кватернион поворота КА); $w(t) = w_1(t)i_1 + w_2(t)i_2 + w_3(t)i_3$ (вектор угловой скорости КА) — фазовые координаты; $M(t) = [M_1(t), M_2(t), M_3(t)]^T$ — вектор внешнего момента, действующего на КА, — управление; R — тензор инерции. Фазовые координаты и управление подчинены требованиям задачи понтрягинского типа ($L(t)$, $w(t)$ — непрерывные функции, $M(t)$ — кусочно-непрерывная функция); кватернион $L(t)$ нормирован, т. е. $\|L\| = l_0^2 + l_1^2 + l_2^2 + l_3^2 = 1$; i_1, i_2, i_3 — орты гиперкомплексного пространства (мнимые единицы Гамильтона), символ "o" означает кватернионное умножение, а "[. , .]" — векторное произведение. В динамических уравнениях Эйлера (2) для твердого тела (КА) I_1, I_2, I_3 — главные центральные моменты инерции твердого тела.

На модуль вектора управления наложено ограничение

$$|M| \leq M_{\max}. \quad (3)$$

Заданы произвольные граничные условия по угловому положению

$$L(0) = L_0; L(T) = L_T \quad (4)$$

и угловой скорости КА:

$$w(0) = w_0, w(T) = w_T. \quad (5)$$

Требуется определить оптимальное управление $M^{\text{опт}}(t)$ системой (1), (2) при ограничении на управление (3) и граничных условиях (4), (5), доставляющее минимум функционалу

$$J = \int_0^T (\alpha_1 + \alpha_2 |M|) dt, \quad (6)$$

где $\alpha_1, \alpha_2 = \text{const} > 0$. Время T не задано.

2. Переход к безразмерным переменным. Перейдем от размерных переменных задачи к безразмерным по формулам

$$\begin{aligned} I_k^{\text{безраз}} &= I_k^{\text{раз}} / I^{\text{масш}}, k = 1, 2, 3; \\ \alpha_2^{\text{безраз}} &= \alpha_2^{\text{раз}} M^{\text{масш}}, w^{\text{безраз}} = w^{\text{раз}} T^{\text{масш}}, \\ t^{\text{безраз}} &= t^{\text{раз}} / T^{\text{масш}}, M^{\text{безраз}} = M / M^{\text{масш}}, \\ J^{\text{безраз}} &= J^{\text{раз}} / T^{\text{масш}}, \end{aligned}$$

где масштабные коэффициенты $I^{\text{масш}}, T^{\text{масш}}, M^{\text{масш}}$ задаются следующим образом:

$$\begin{aligned} I^{\text{масш}} &= ((I_1^2 + I_2^2 + I_3^2)/3)^{1/2}; M^{\text{масш}} = M_{\max}; \\ T^{\text{масш}} &= (I^{\text{масш}} / M^{\text{масш}})^{1/2}, \end{aligned}$$

при этом вид формул (1), (2), (4)–(6) не изменится, а ограничение (3) запишется в виде

$$|M| \leq 1.$$

Далее будем иметь в виду постановку задачи в безразмерных переменных, верхние индексы у них будут опущены.

3. Применение принципа максимума. Выполним процедуру принципа максимума Л. С. Понтрягина [1, 8]. Введем вспомогательные функции $\Psi(t)$ (кватернион) и $\varphi(t)$ (вектор), соответствующие фазовым координатам $L(t), w(t)$. Составим функцию Гамильтона—Понтрягина:

$$\begin{aligned} H &= -\psi^*(\alpha_1 + \alpha_2 |M|) + (\Psi, L \circ w)/2 + \\ &+ (\varphi, R^{-1}M - R^{-1}[w, R w]), \end{aligned} \quad (7)$$

где постоянная $\psi^* \geq 0$, а "(., .)" — скалярное произведение векторов.

Будем рассматривать случай $\psi^* > 0$, так как функция Гамильтона—Понтрягина (7) при $\psi^* = 0$ будет соответствовать задаче быстрого действия и не будет учитывать критерий (6). В силу однородности

функции Гамильтона—Понтрягина H [8] в формуле (7) положим $\psi^* = 1$.

Сопряженная система:

$$\begin{cases} 2\dot{\Psi} = \Psi \circ w; \\ \dot{\varphi} = -\text{vect}(\tilde{L} \circ \Psi)/2 - [R^{-1}\varphi, R w] + R[R^{-1}\varphi, w], \end{cases} \quad (8)$$

где "vect(.)" обозначает векторную часть кватерниона, а "~" — сопряжение кватерниона.

Как видно, уравнения для переменных Ψ и L совпадают с точностью до константы. Используя этот факт и введя обозначение [1]

$$p = \text{vect}(\tilde{L} \circ \Psi) = \tilde{L} \circ c_v \circ L, \quad (9)$$

где c_v — произвольная векторная постоянная, сопряженную систему (11) запишем в виде

$$\begin{cases} \dot{p} = [p, w]; \\ \dot{\varphi} = p/2 - [R^{-1}\varphi, R w] + R[R^{-1}\varphi, w]. \end{cases} \quad (10)$$

Следует отметить, что применение этого приема [1], основанного на самосопряженности дифференциальной кватернионной системы уравнений (1) (замена кватернионной сопряженной переменной Ψ (8) на векторную переменную p (9)), позволяет понизить размерность краевой задачи, получаемой после применения принципа максимума, на единицу.

Условие максимума функции Гамильтона—Понтрягина (7) на компактном множестве (3) дает следующую структуру оптимального управления:

$$M_{\text{опт}} = \begin{cases} R^{-1}\varphi/|R^{-1}\varphi|, & \text{если } |R^{-1}\varphi| \geq \alpha_2; \\ 0, & \text{если } |R^{-1}\varphi| < \alpha_2; \\ M_{\text{ос}}, & \text{если } |R^{-1}\varphi| \equiv \alpha_2, t \in [t^*, t^{**}]; \end{cases} \quad (11)$$

$$M_{\text{ос}} = k(t)R^{-1}\varphi/\alpha_2, 0 \leq k(t) \leq 1, \quad (12)$$

где t^*, t^{**} — моменты начала и окончания особого режима управления.

Таким образом, траектория углового движения КА может состоять из активных участков, участков свободного движения или иметь участки особого режима управления.

4. Исследование особого режима управления. Особый режим управления (12) характеризуется тем, что при нем гамильтониан (7) перестает явным образом зависеть от управления. Тогда следует перейти к исследованию производных разных порядков функции Гамильтона—Понтрягина, фазовых и сопряженных переменных задачи.

На особом режиме имеем

$$|R^{-1}\varphi| \equiv \alpha_2; \quad (13)$$

$$H = -\alpha_1 + (w, p)/2 - (\varphi, R^{-1}[w, R w]) = 0. \quad (14)$$

Соотношение (13) можно записать в виде

$$(R^{-1}\varphi)^2 = \alpha_2^2. \quad (15)$$

Дифференцируя соотношение (15) по t и используя (10), получим

$$\frac{d(R^{-1}\varphi)^2}{dt} = -(R^{-2}\varphi, p) - 2(R^{-2}\varphi, [R^{-1}\varphi, w]) = 0. \quad (16)$$

Дифференцируя соотношение (16) по t и учитывая, что на этапе особого управления

$$\dot{w} = R^{-2}\varphi k(t)/\alpha_2 - R^{-1}[w, R w], \quad (17)$$

получим

$$\begin{aligned} \frac{d^2(R^{-1}\varphi)^2}{dt^2} &= (R^{-2}p)/2 - (R_1 p, [R^{-2}\varphi, w]) + \\ &+ 2(R_2[R^{-2}\varphi, w][R^{-2}\varphi, w]) = 0, \end{aligned} \quad (18)$$

где матрицы R_1 и R_2 определяются так:

$$R_1 = \begin{bmatrix} A & 0 & 0 \\ 0 & B & 0 \\ 0 & 0 & C \end{bmatrix}, \quad R_2 = \begin{bmatrix} D & 0 & 0 \\ 0 & E & 0 \\ 0 & 0 & F \end{bmatrix},$$

$$A = I_1^{-2}(I_1(I_2 + I_3) - I_1^2 - 2I_2I_3),$$

$$B = I_2^{-2}(I_2(I_1 + I_3) - I_2^2 - 2I_1I_3),$$

$$C = I_3^{-2}(I_3(I_1 + I_2) - I_3^2 - 2I_1I_2),$$

$$D = I_1^{-2}I_2I_3(I_1 - I_2)(I_1 - I_3),$$

$$E = I_2^{-2}I_1I_3(I_2 - I_1)(I_2 - I_3),$$

$$F = I_3^{-2}I_1I_2(I_3 - I_1)(I_3 - I_2).$$

Обе части соотношения (18) дифференцируем по t . Получим

$$\begin{aligned} \frac{d^3(R^{-1}\varphi)^2}{dt^3} &= (R^{-2}p - R_1[R^{-2}\varphi w], [p, 2]) + \\ &+ (([R^{-2}p/2 + R^{-2}[R^{-1}\varphi, R w] - R^{-1}[R^{-1}\varphi, w]], w) - \\ &- [R^{-1}[w, R w], R^{-2}\varphi], R_1 p - 4R_2[R^{-2}\varphi, w]) = 0. \end{aligned} \quad (19)$$

Таким образом, на этапе особого управления сопряженные переменные p , φ и фазовая переменная w удовлетворяют соотношениям (первым интегралам) (14), (15), (16), (18), (19), т. е. на шесть скалярных переменных $p_1, p_2, p_3, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ на этапе особого управления налагаются пять условий (14), (15), (16), (18), (19).

Для определения оптимального управления на особом этапе вычислим производную по t от обеих частей соотношения (19), учитывая соотношения (2), (10), (12), (17):

$$\begin{aligned} \frac{d^4(R^{-1}\varphi)^2}{dt^4} &= (R^{-2}[p, w] - R_1([R^{-2}(-p/2 - \\ &- [R^{-1}\varphi, R w] + R[R^{-1}\varphi, w]), w] - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &- [R^{-2}\varphi, R^{-1}[w, R w]], [p, w]) + (R^{-2}p - \\ &- R_1[R^{-2}\varphi, w], [[p, w], w] + [p, R^{-2}\varphi k(t)/\alpha_2 - \\ &- R^{-1}[w, R w]]) + (([R^{-2}[p, w]/2 + R^{-2}([R^{-1}(-p/2 - \\ &- [R^{-1}\varphi, R w] + R[R^{-1}\varphi, w]), R w] - \\ &- [R^{-1}\varphi, [w, R w]]) - R^{-1}([R^{-1}(-p/2 - \\ &- [R^{-1}\varphi, R w] + R[R^{-1}\varphi, w]), w] + \\ &+ [R^{-1}\varphi, R^{-2}\varphi k(t)/\alpha_2 - R^{-1}[w, R w]]), w] + \\ &+ [(R^{-2}p/2 + R^{-2}[R^{-1}\varphi, R w] - \\ &- R^{-1}[R^{-1}\varphi, w]), R^{-2}\varphi k(t)/\alpha_2 - R^{-1}[w, R w]] - \\ &- ([R^{-1}([R^{-2}\varphi k(t)/\alpha_2 - R^{-1}[w, R w], R w] + \\ &+ [w, R^{-1}\varphi k(t)/\alpha_2 - [w, R w]]), R^{-2}\varphi] + \\ &+ [R^{-1}[w, R w], R^{-2}(-p/2 - [R^{-1}\varphi, R w] + \\ &+ R[R^{-1}\varphi, w])), R_1 p - 4R_2[R^{-2}\varphi, w]) + \\ &+ (R^{-2}p/2 + R^{-2}[R^{-1}\varphi, R w] - R^{-1}[R^{-1}\varphi, w]), w] - \\ &- R^{-1}[w, R w], R^{-2}\varphi], R_1[p, w] - 4R_2([R^{-2}(-p/2 - \\ &- [R^{-1}\varphi, R w] + R[R^{-1}\varphi, w]), w] - \\ &- [R^{-2}\varphi, R^{-1}[w, R w]])) = 0. \end{aligned} \quad (20)$$

Для краткости введем обозначения:

$$\begin{aligned} -p/2 - [R^{-1}\varphi, R w] + R[R^{-1}\varphi, w] &= z_1, \\ [p, w] &= z_2, [R^{-2}\varphi, w] = z_3, \\ [R^{-1}\varphi, w] &= z_4, [R^{-2}\varphi, R w] = z_5, \\ [w, R w] &= z_6, [R^{-1}\varphi, R w] = z_7. \end{aligned} \quad (21)$$

С использованием (21) из (20) получим выражение для величины $k(t)$:

$$k(t) = -\alpha_2 F_1/F_2, \quad (22)$$

$$\begin{aligned} F_1 &= (R^{-2}z_2 - R_1([R^{-2}z_1, w] - [R^{-2}\varphi, R^{-1}z_6]), z_2) + \\ &+ (R^{-2}p - R_1z_3, [z_2, w] - [p, R^{-1}z_6]) + ([R^{-2}z_2/2 + \\ &+ R^{-2}([R^{-1}z_1, R w] - [R^{-1}\varphi, z_6]) - R^{-1}([R^{-1}z_1, w] - \\ &- [R^{-1}\varphi, R^{-1}z_6]), w] + [R^{-2}z_1, R^{-1}z_6] + \\ &+ ([R^{-1}([R^{-1}z_6, R w] + [w, z_6]), R^{-2}\varphi] + \\ &+ [R^{-1}z_6, R^{-2}z_1]), R_1 p - 4R_2z_3) - ([R^{-2}z_1, w] + \\ &+ [R^{-1}z_6, R^{-2}\varphi], R z_2 - 4R_2([R^{-2}z_1, w] - \\ &- [R^{-2}\varphi, R^{-1}z_6])); \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} F_2 &= (R^{-2}p - R_1z_3, [p, R^{-2}\varphi]) - \\ &- ([R^{-1}[R^{-1}\varphi, R^{-2}\varphi], w] + R^{-2}z_1, R^{-2}\varphi] + \\ &+ [R^{-1}(z_5 - z_4), R^{-2}\varphi], R_1 p - 4R_2z_3). \end{aligned} \quad (24)$$

В итоге, оптимальное управление при особом режиме примет вид

$$M_{oc} = F_1 R^{-1}\varphi/F_2, \quad (25)$$

при этом должно выполняться условие

$$|M_{oc}| = |F_1 R^{-1}\varphi/F_2| \leq 1. \quad (26)$$

5. О переходе от особого режима управления к другим режимам и наоборот. Согласно (11) режим управления определяется поведением $|R^{-1}\phi|$. На особом режиме управления $|R^{-1}\phi| \equiv \alpha_2$ при $t_* \leq t \leq t_{**}$, где t_* , t_{**} — моменты начала и окончания особого режима соответственно.

Исследуем переход от особого режима управления к режиму управления $|M_{\text{опт}}| = 1$ в момент времени $t = t_{**}$. Для этого рассмотрим поведение $|R^{-1}\phi|^2$ при $t \geq t_{**}$.

Разложим $|R^{-1}\phi|^2$ по формуле Тейлора при $t \geq t_{**}$:

$$\begin{aligned} |R^{-1}\phi|^2 &= |R^{-1}\phi|^2|_{t=t_{**}} + \left. \frac{d|R^{-1}\phi|^2}{dt} \right|_{t=t_{**}} (t - t_{**}) + \\ &+ \frac{1}{2} \left. \frac{d^2|R^{-1}\phi|^2}{dt^2} \right|_{t=t_{**}} (t - t_{**})^2 + \\ &+ \frac{1}{6} \left. \frac{d^3|R^{-1}\phi|^2}{dt^3} \right|_{t=t_{**}} (t - t_{**})^3 + \\ &+ \frac{1}{24} \left. \frac{d^4|R^{-1}\phi|^2}{dt^4} \right|_{t=t_{**}} (t - t_{**})^4 + o((t - t_{**})^4). \end{aligned} \quad (27)$$

Так как фазовые и сопряженные переменные непрерывны на всем промежутке управления, то согласно (2), (11), (15), (16), (18), (19) при переходе к пределу при $t = t_{**}$ с правой стороны получим, что для функции $|R^{-1}\phi|^2$ и ее первых трех производных выполняются следующие соотношения:

$$\begin{aligned} |R^{-1}\phi|^2|_{t=t_{**}} &= \alpha_2^2, \\ \left. \frac{d|R^{-1}\phi|^2}{dt} \right|_{t=t_{**}} &= 0, \dots, \left. \frac{d^3|R^{-1}\phi|^2}{dt^3} \right|_{t=t_{**}} = 0. \end{aligned} \quad (28)$$

Для четвертой производной согласно (20) получим выражение

$$\left. \frac{d^4|R^{-1}\phi|^2}{dt^4} \right|_{t=t_{**}} = \left(F_1 + \frac{1}{\alpha_2} F_2 \right) |_{t=t_{**}}, \quad (29)$$

где F_1 , F_2 определяются формулами (23), (24) соответственно, так как оптимальное управление в окрестности правее $t = t_{**}$ удовлетворяет условию $|M_{\text{опт}}| = 1$.

Для того чтобы при $t = t_{**}$ был возможен переход от особого режима управления к режиму управления $|M_{\text{опт}}| = 1$, в окрестности правее $t = t_{**}$ функция $|R^{-1}\phi|^2$ должна согласно (11) возрастать или оставаться постоянной, а это возможно при условии

$$\left(F_1 + \frac{1}{\alpha_2} F_2 \right) |_{t=t_{**}} \geq 0. \quad (30)$$

Так же исследуя переход от особого режима управления к режиму управления $M_{\text{опт}} \equiv 0$, получим, что для функции $|R^{-1}\phi|^2$ и ее первых трех производных при переходе к пределу к $t = t_{**}$ с правой стороны выполняются соотношения (28), а для четвертой производной согласно (20) получим выражение

$$\left. \frac{d^4|R^{-1}\phi|^2}{dt^4} \right|_{t=t_{**}} = F_2|_{t=t_{**}}. \quad (31)$$

Для того чтобы при $t = t_{**}$ был возможен переход от особого режима управления к режиму управления $M_{\text{опт}} \equiv 0$, в окрестности правее $t = t_{**}$ функция $|R^{-1}\phi|^2$ должна убывать, а это возможно при условии

$$F_2|_{t=t_{**}} \leq 0. \quad (32)$$

Условия перехода от режимов управления $|M_{\text{опт}}| = 1$ или $M_{\text{опт}} \equiv 0$ к особому режиму управления в момент времени $t = t_*$ получаются аналогичными условиями (30), (32).

При выполнении равенств в условиях (30), (32) в момент перехода от особого режима управления к режимам $|M_{\text{опт}}| = 1$, $M_{\text{опт}} \equiv 0$, или наоборот, оптимальное управление будет оставаться непрерывным.

Таким образом, при произвольной динамической конфигурации КА (твердого тела) возможны переходы от особых режимов управления к другим режимам управления, и наоборот. Следует отметить, что в частном случае $R = I^*E$, где $I^* = I_1 = I_2 = I_3$, а E — единичная матрица (т. е. в случае КА со сферической динамической симметрией) такие переходы невозможны, и особый режим управления носит изолированный характер [7].

Список литературы

1. Бранец В. Н., Шмыглевский И. П. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. М.: Наука, 1973. 320 с.
2. Scrivener S. L., Thompson R. C. Survey of time-optimal attitude maneuvers // J. guidance, control, and dynamics. 1994. V. 17. № 2. P. 225—233.
3. Петров Б. Н., Боднер В. А., Алексеев К. Б. Аналитическое решение задачи управления пространственным поворотным маневром // Докл. АН СССР. 1970. Т. 192. № 6. С. 1235—1238.
4. Сиротин А. Н. Оптимальное управление переориентацией симметричного твердого тела из положения покоя в положение покоя // Изв. АН СССР. МТТ. 1989. № 1. С. 36—46.
5. Молоденков А. В. Кватернионное решение задачи оптимального в смысле минимума энергетических затрат разворота твердого тела // Проблемы механики и управления. Сб. науч. трудов. Пермь: ПГУ, 1995. С. 122—131.
6. Бранец В. Н., Черток М. Б., Казначеев Ю. В. Оптимальный разворот твердого тела с одной осью симметрии // Космические исследования. 1984. Т. 22. Вып. 3. С. 352—360.
7. Молоденков А. В., Сапунков Я. Г. Особый режим управления в задаче оптимального разворота сферически-симметричного космического // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2009. № 6. С. 47—54.
8. Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкрелдзе Р. В., Мищенко Е. Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1961. 384 с.

А. С. Девятисильный, д-р техн. наук, гл. науч. сотр.,
devyatis@iacp.dvo.tu

К. А. Числов, канд. техн. наук, мл. науч. сотр.,
kirillche@rambler.ru

Институт автоматизации и процессов управления
ДВО РАН, г. Владивосток

Модель позиционно корректируемой двухкомпонентной гравиинерциальной навигационной системы на основе интерпретации принципа Д'Аламбера

Дано краткое обоснование физически и математически корректной системы определения параметров движения объекта и значения напряженности гравитационного поля Земли. Представлены результаты численного исследования.

Ключевые слова: инерциальная навигация, спутниковая навигационная система, гироскоп, ньютонометр, коррекция, гравиметрия, обратная задача, вейвлет

Введение

Объективный характер и высокая устойчивость результатов гравиметрической разведки делают ее важнейшей составной частью задач изучения земной коры, поиска нефти, газа, угля и других полезных ископаемых. Процесс гравиметрии условно можно разбить на два этапа [1]. На первом из них, в рамках которого только и ведется обсуждение предметной области в данной статье, решаются задачи текущего и апостериорного оценивания локальных значений вектора напряженности гравитационного поля Земли (GE -поля) и их географической привязки; на втором — выполняется геологическая интерпретация массива полученных на первом этапе данных.

Возможность оперативного и детального охвата гравиметрическими наблюдениями больших и/или труднодоступных районов (например, что вполне актуально, арктических) достигается благодаря их реализации на подвижных объектах. В этом случае обе задачи — собственно гравиметрии и географической привязки ее результатов — с учетом общности физических (теоретико-механических) представлений, лежащих в основе гравиметрии и инерциальной навигации, могут быть поставлены и решены в рамках единой обратной задачи, которая является, по сути, моделью инерциальной навигационной системы (ИНС/INS), функционирующей в условиях неполной гравитационной определенности и корректируемой по информации, доставляемой спутниковой навигационной системой (СНС/SNS), например, типа ГЛОНАСС/GLONASS.

В работе [2] исследована модель такой гравиинерциальной навигационной системы (ГИНС), построенной на базе двухкомпонентной (по числу ньютонометров) ИНС (2D-ИНС). Переход к ней от модели 3D-системы осуществляется при условии движения объекта по сфере, которое, вообще говоря, в реальности трудновыполнимо.

В настоящей статье также рассматривается схема ГИНС на базе 2D-ИНС, переход к которой от схемы на базе 3D-ИНС выполняется на основе интерпретации принципа Д'Аламбера [3], что снимает какие-либо ограничения на движение объекта. Модель такой ГИНС отождествляется с моделью обратной задачи, представляемой в форме "состояние—измерение", исходно ориентированной на решение методом динамического обращения (МДО/IDM) [4] с использованием алгоритма калмановского типа [5]. При этом учитывается, что образующие инструментальную компоненту ГИНС инерциальные измерители (гироскопы и ньютонометры), так же как и СНС, функционируют с погрешностями стохастического характера, которые трансформируются в решение задачи, что в конечном итоге требует дополнительной апостериорной обработки результатов динамического обращения. Для этой цели предлагается использовать вейвлет-технологии, хорошо уже себя зарекомендовавшие ранее [6].

Основные модельные представления

В качестве исходных будем рассматривать уравнения идеальной работы 3D-ИНС в проекциях на оси ортогонального координатного трехгранника $ou = ou_1u_2u_3$, вращающегося с абсолютной угловой скоростью $\omega = (\omega_i)$, $i = \overline{1, 3}$, а именно [2]:

$$D\mathbf{q} = \mathbf{p}; \mathbf{q}(0) = \mathbf{q}_0;$$

$$D\mathbf{p} = \mathbf{G} + \mathbf{F}; \mathbf{p}(0) = \mathbf{p}_0;$$

$$D\mathbf{A} = \mathbf{0}; \mathbf{A}(0) = \mathbf{A}_0, \quad (1)$$

где $\mathbf{D} = (D_{ij})$ — оператор абсолютного дифференцирования, $D_{ij} = \frac{d}{dt} - e_{ikj}\omega_k$, e_{ikj} — псевдотензор Леви—Чивита; $\mathbf{q} = (q_i)$, $\mathbf{p} = (p_i)$, $\mathbf{G} = (G_i)$, $\mathbf{F} = (F_i)$ — соответственно радиус-вектор положения объекта (отождествляемого с материальной точкой \tilde{o} единичной массы), вектор удельных импульсов (в нашем случае — вектор абсолютной линейной скорости точки \tilde{o}), вектор напряженности GE -поля и вектор удельных сил негравитационной природы; $\mathbf{A} = (A_{ij})$ — матрица ориентации трехгранника ou относительно инерциальной системы отсчета; первые два векторных уравнения (для \mathbf{q} и \mathbf{p}) составляют динамическую группу уравнений (ДГУ) 3D-ИНС; последнее, матричное, — кинематическое уравнение Пуассона;

здесь и далее действует правило суммирования по повторяющимся индексам.

Примем, что начало (o) трехгранника ou находится в центре масс Земли, а инерциальные измерения (значений \mathbf{F} и $\boldsymbol{\omega}$) выполняются в приборном трехграннике $\tilde{o}y = \tilde{o}y_1y_2y_3$ с началом в точке \tilde{o} , размещенной на оси ou_3 , и осями ($\tilde{o}y_1, \tilde{o}y_2, \tilde{o}y_3$), параллельными соответствующим осям трехгранника ou , причем оси $\tilde{o}y_1$ и $\tilde{o}y_2$ направлены, соответственно, на географические Восток и Север.

Относительно дополнительной (неинерциальной) информации, наличие которой обязательно, если речь идет о математической постановке задачи коррекции ИНС в форме модели обратной задачи, предполагается что она доставляется СНС, является полной позиционной и представляется измерениями модуля радиус-вектора ($|\mathbf{q}| = q_3 = r$), широты (φ) и долготы (λ) в геоцентрической системе координат, так что

$$J_r = r + \varepsilon, J_\varphi = \varphi + \varepsilon_\varphi, J_\lambda = \lambda + \varepsilon_\lambda, \quad (2)$$

где $(J_r, J_\varphi, J_\lambda)^T$ и $(\varepsilon, \varepsilon_\varphi, \varepsilon_\lambda)^T$ — векторы соответственно измерений и их инструментальных погрешностей.

Уравнения (1) и (2) вместе составляют модель общей ("в большом") обратной задачи, генеральной целью решения которой является определение координат и скоростей объекта, а также его пространственной ориентации как твердого тела. При этом моделирование уравнений (1) с учетом измеренных значений $\boldsymbol{\omega}$ и \mathbf{F} , т. е. реализация автономного режима работы ИНС, дает возможность иметь опорные ($\tilde{\mathbf{q}}, \tilde{\mathbf{p}}, \tilde{\mathbf{A}}$) значения \mathbf{q}, \mathbf{p} и \mathbf{A} с последующей постановкой обратной задачи "в малом", которая, главным образом, и обсуждается далее.

Учитывая, что при измерении F_i, ω_i и q_3 обычно реализуется процедура динамического сглаживания (режим отслеживания параметра), можно считать, что в конечном итоге доступными являются не только их сглаженные оценки (т. е. $\tilde{F}_i, \tilde{\omega}_i$ и \tilde{q}_3), но и производные, в частности, $\dot{\omega}_i, \dot{q}_3, \ddot{q}_3$. Далее примем, что $\tilde{q}_3 = J, \tilde{\dot{q}}_3 = \dot{q}_3 + \varepsilon_1, \tilde{\ddot{q}}_3 = \ddot{q}_3 + \varepsilon_2, \tilde{F}_i = F_i + f_i, \tilde{\omega}_i = \omega_i + v_i, \tilde{\Delta}_i = \Delta_i$, где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, f_i, v_i, \Delta_i$ — инструментальные погрешности.

Изложенное представляет возможность при построении опорного решения ДГУ ограничиться моделированием только первых четырех уравнений ($i = \overline{1, 2}$), т. е. перейти, по сути, к схеме 2D-ИНС, в которой, следует отметить, модельные значения переменных q_3 и p_3 ($p_3 = \dot{q}_3 + \omega_2q_1 - \omega_1q_2$), а также напряженности GE -поля формируются с учетом значений сглаженных оценок \tilde{q}_3 и $\tilde{\dot{q}}_3$. Вместе с тем,

в силу того, что при таком моделировании не вычисляется опорное значение q_3 , построение невязки измерения $\delta J_r = \delta q_3 + \varepsilon$ и постановка задачи коррекции как обратной задачи "в малом" в той форме, в которой это было сделано, например в [7], теперь уже невозможно.

Однако возможен другой путь. Обратимся к принципу Д'Аламбера [3]: "если в какое-либо мгновение к физическим силам, действующим на данную механическую совокупность (или любую ее часть), присоединить все относящиеся к ней даламберовы силы инерции, то образуется система сил, статически эквивалентная нулю". Актуализируя этот принцип на оси ou_3 , имеем условие

$$J_d = \dot{p}_3 - \omega_2p_1 + \omega_1p_2 - G_3 - F_3 = 0,$$

или

$$J_d = \ddot{q}_3 - (\dot{\omega}_2 + \omega_3^2)q_1 - (\omega_2\omega_3 - \dot{\omega}_1)q_2 + (\omega_1^2 + \omega_2^2)q_3 - 2\omega_2p_1 + 2\omega_1p_2 - G_3 - F_3 = 0. \quad (3)$$

Подстановка в (3) значений переменных, доступных благодаря измерениям и моделированию ДГУ в режиме 2D-ИНМ ($i = \overline{1, 2}$), приводит к невязке $\delta J_d \neq 0$, содержащей информацию о погрешностях моделирования, которая может быть использована при поставке обратной задачи "в малом" для оценки значений этих погрешностей. Модель такой ограниченной задачи принимает вид

$$\begin{aligned} \delta \dot{q}_i &= -e_{ikj}\omega_k \delta q_j + \delta p_i - e_{ikj}v_k q_j; \delta q_i(0) = \delta q_{i,0}; \\ \delta \dot{p}_i &= -e_{ikj}\omega_k \delta p_j + \delta G_i(r, \mathbf{q}) + f_i - e_{ikj}v_k p_j; \delta p_i(0) = \delta p_{i,0}; \\ \delta J_d &= (\dot{\omega}_2 + \omega_3^2)\delta q_1 - (\omega_2\omega_3 - \dot{\omega}_1)\delta q_2 + 2\omega_2\delta p_1 - \\ &\quad - 2\omega_1\delta p_2 + \delta G_3(r, \mathbf{q}) - (\omega_1^2 + \omega_2^2)\varepsilon + \varepsilon_2 + f_3; \\ &\quad i = 1, 2, j, k, = \overline{1, 3}, \end{aligned} \quad (4)$$

где следует считать, что $\delta G_i(r, \mathbf{q}) = g_i + \frac{\partial G_i(r, \mathbf{q})}{\partial r} \delta r + \frac{\partial G_i(r, \mathbf{q})}{\partial q_j} \delta q_j$; $\mathbf{g} = (g_i), i = 1, 2, 3$ — вектор аномалии GE -поля в текущей точке траектории; $q_1 = q_2 = 0, q_3 = r, p_1 = \omega_2q_3, p_2 = -\omega_1p_3, p_3 = \dot{q}_3, \delta q_3 = \delta r = \varepsilon, \delta p_3 = \varepsilon_1 - \omega_2\delta q_1 + \omega_1\delta q_2$.

Далее, считая, что имеет место существенное преобладание значения вертикальной компоненты аномалии (g_3) над горизонтальными (g_1, g_2), полагаем $g_1 = 0, g_2 = 0$. Тогда расширение вектора состояния системы (4) за счет включения в него g_3 с одновременным пополнением системы (4) уравнением эволюции g_3 (в частности, $\dot{g}_3 = 0$) дает воз-

возможность найти оценку g_3 и решить, таким образом, задачу уточнения модели GE -поля на заданной траектории и оценки углов наклона приборной плоскости $\tilde{\delta} y_1 y_2$. При этом качество оценки g_3 будет тем выше, чем менее изменчиво g_3 на временном интервале наблюдения по сравнению с изменчивостью погрешностей ε , ε_2 и f_3 . Относительно последней отметим следующее. Погрешность f_3 может быть погрешностью вертикального ньютонометра (его роль может исполнять и высокоточный гравиметр) или погрешностью априорных представлений о силе F_3 , формируемых при организации программных траекторий для объекта-носителя. В обоих случаях возможно еще одно дополнительное расширение вектора состояния задачи за счет включения в него кроме g_3 еще и f_3 . При этом очевидна желательность ситуации, когда характеры эволюции g_3 и f_3 отличны.

Следуя далее работе [2], полную модель обратной задачи в малом, соответствующую модели (1), можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \delta \dot{q}_i &= -e_{ikj} \omega_k \delta q_j + \delta p_i - e_{ikj} v_k q_j; \delta q_i(0) = \delta q_{i,0}; \\ \delta \dot{p}_i &= -e_{ikj} \omega_k \delta p_j - \delta G_i(r, \mathbf{q}) + f_i - e_{ikj} v_k p_j; \delta p_i(0) = \delta p_{i,0}; \\ \dot{\beta}_m &= -e_{mkj} \omega_k \beta_j + v_m; \beta_m(0) = \beta_{m,0}; \\ \dot{f}_3 &= -\lambda_{f_3} f_3 + \sqrt{2\lambda_{f_3}} \sigma_{f_3} w; f_3(0) = f_{3,0}; \\ \dot{g}_3 &= 0; g(0) = g_0; \\ \delta J_d &= (\dot{\omega}_2 + \omega_3^2) \delta q_1 - (\omega_2 \omega_3 - \dot{\omega}_1) \delta q_2 + \\ &+ 2\omega_2 \delta p_1 + \delta G_3(r, \mathbf{q}) - (\omega_1^2 + \omega_2^2) \varepsilon + \varepsilon_2 + f_3; \\ \delta J_\varphi &= \varphi_{\text{ИНС}} - \varphi_{\text{СНС}} = \frac{\delta q_2}{r} - \beta_1 + \varepsilon_\varphi; \\ \delta J_\lambda &= (\lambda_{\text{ИНС}} - \lambda_{\text{СНС}}) \cos \varphi = -\frac{\delta q_1}{r} - \beta_2 + \varepsilon_\lambda, \quad (5) \end{aligned}$$

где $(\varphi_{\text{ИНС}}, \lambda_{\text{ИНС}})$ и $(\varphi_{\text{СНС}}, \lambda_{\text{СНС}})$ — соответственно ИНС- и СНС-определения значений φ и λ ; $\boldsymbol{\beta} = (\beta_m)$,

$m = \overline{1, 3}$, — вектор малого угла рас- согласования расчетного (модельного) и приборного координатных трехгранников; инструментальные погрешности гироскопов ($v_i, i = \overline{1, 3}$), планарных ньютонометров ($f_i, i = \overline{1, 2}$), СНС-определений ($\varepsilon, \varepsilon_\varphi, \varepsilon_\lambda$) и оценки значения \ddot{r} (ε_2) — представляются несмещенными белыми шумами с нулевыми средними и, соответственно, интенсивностями $\sigma_v^2, \sigma_f^2, \sigma_{\varepsilon_\varphi}^2, \sigma_{\varepsilon_\lambda}^2, \sigma_\varepsilon^2, \sigma_{\varepsilon_2}^2$, а гравиметра (в его роли выступает вертикальный

ньютонометр) — несмещенным марковским процессом с параметрами сноса и диффузии — λ_{f_3} и σ_{f_3} ; углы, характеризующие отклонение плоскости $\tilde{\delta} y_1 y_2$ приборного трехгранника от горизонта, определяются как $\alpha_1 = \frac{\delta q_2}{r}, \alpha_2 = -\frac{\delta q_1}{r}$.

Вычислительные эксперименты

В выполненных численных исследованиях задачи (5) предполагалось, что модельное GE -поле является центральным, а при формировании вектора $\mathbf{G}(r, \mathbf{q})$ используются измеренные значения $r = |\mathbf{q}|$, так что $\delta G_i(r, \mathbf{q}) = -\omega_0^2 \delta q_i, i = \overline{1, 2}$, и $\delta G_3 = g - 2\omega_0^2 \varepsilon$, где $\omega_0^2 = \frac{\mu}{r^3}$ — частота Шулера.

Учитывая представление модели ГИНС в виде "состояние—измерение", для численного решения задачи (5) использовался алгоритм калмановской фильтрации.

На рис. 1—3 представлены некоторые результаты одного из экспериментов, причем на рис. 3 приведены и результаты апостериорной обработки с использованием вейвлет-технологий [6, 8].

Предполагается, что объект движется в восточном направлении на широте $\varphi = 45^\circ$ со скоростью $v = 100$ м/с, причем в радиальном направлении ускорение его движения описывается как

$$\ddot{r} = A \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 \sin \frac{2\pi}{T} t, \text{ где } A = 10 \text{ м, } T = 20\pi \text{ с, и оце-}$$

нивается с погрешностью, имеющей нулевое среднее и значение среднеквадратического отклонения (СКО) $\sigma_{\varepsilon_2} = 5 \cdot 10^{-4}$ м/с² при исходном СКО измерения $r(t)$, равном 1 м, т. е. $\sigma_\varepsilon = 1$ м; погрешности ε_φ и ε_λ имеют нулевые средние и СКО, соответственно, $\sigma_\varphi = \sigma_\lambda = 1,5 \cdot 10^{-6}$ рад; инструментальные

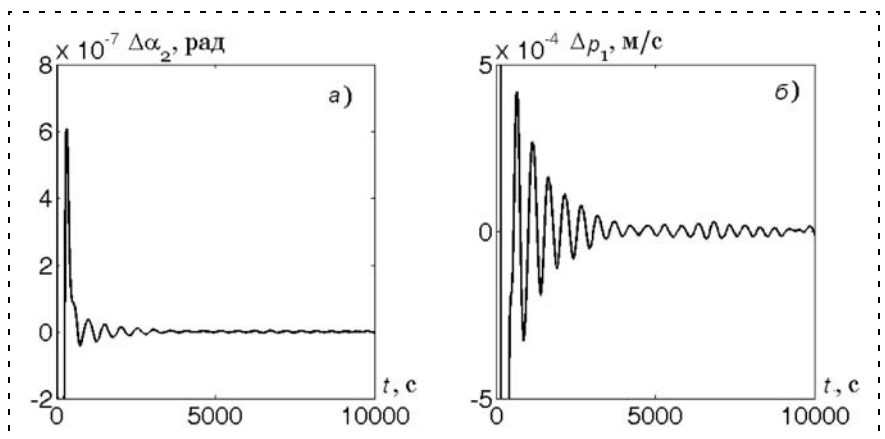


Рис. 1. Примеры эволюции погрешностей ($\Delta\alpha_2, \Delta\rho_1$) динамического обращения

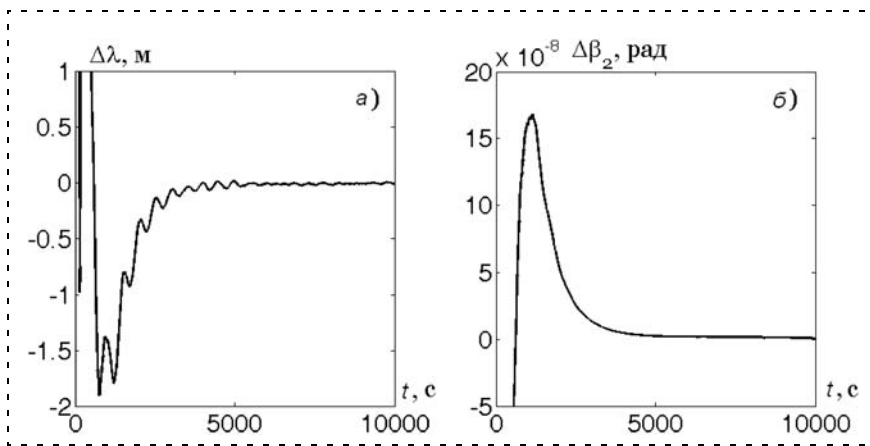


Рис. 2. Примеры эволюции погрешностей ($\Delta\lambda$, $\Delta\beta_2$) динамического обращения

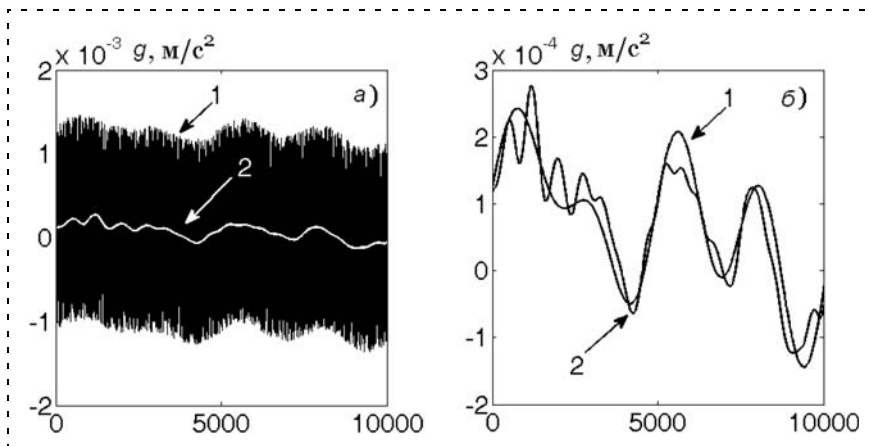


Рис. 3. Результаты оценивания функции $g(t)$:

(а) 1 — калмановская оценка; 2 — вейвлет-оценка; (б) 1 — функция $g(t)$ и 2 — ее вейвлет-оценка

погрешности ньютометров и гироскопов представляются несмещенными относительно нуля нормальными белыми шумами со следующими СКО: $\sigma_{v_i} = 0,001^\circ/\text{ч} \approx 5 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-1}$; $\sigma_{f_1} = \sigma_{f_2} = 0,001 \text{ м/с}^2$, $\sigma_{f_3} = 10^{-6} \text{ м/с}^2$ (как видим, имеет место значительное преобладание σ_{ε_2} над σ_{f_3} , т. е. $\sigma_{\varepsilon_2} \gg \sigma_{f_3}$).

На рис. 1—3 через $\Delta\alpha_2$, Δp_1 , $\Delta\lambda$, $\Delta\beta_2$ обозначены погрешности калмановского оценивания величин α_2 , p_1 , λ и β_2 .

Как видно из графиков, имеют место как достаточно хорошая сходимость решений, что является прямым следствием корректности математической постановки задачи, так и вполне удовлетворитель-

ная точность определения параметров траектории движения объекта, углов горизонтирования приборной платформы и значения аномалии GE -поля, причем в последнем случае особо важное значение приобретает апостериорная обработка результатов динамического обращения.

Заключение

Таким образом, предложенная интерпретация модели 2D-ГИНС может быть вполне успешно использована при решении задачи навигации и гравиметрии, причем ее перспективы, что показали численные исследования, непосредственно связаны с возможностями высокоточного оценивания второй производной радиус-вектора положения объекта.

Исследование частично поддержано грантами РФФИ-ДВО (№ 09-01-98503-р_восток_а) и ДВО РАН (№ 09-1-П29-02, № 09-III-A-03-066).

Список литературы

1. **Гравиразведка:** Справочник геофизика / Под ред. Е. А. Мудрецов. М.: Недра, 1981. 397 с.
2. **Девятисильный А. С., Числов К. А.** Позиционно-корректируемая гравиинерциальная навигационная система // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 4. С. 58—61.
3. **Ишлинский А. Ю.** Классическая механика и силы инерции. М.: Наука, 1987. 320 с.
4. **Осипов Ю. С., Кряжковский А. В.** Задачи динамического обращения // Вестник РАН. 2006. Т. 76. С. 615—624.
5. **Калман Р., Фалб П., Арбиб М.** Очерки по математической теории систем. М.: Мир, 1971. 400 с. (Kalman R. E., Falb P. L., Arbib M. A. Topics in mathematical system theory. (McGraw-Hill, New York, 1969)).
6. **Девятисильный А. С., Дорожко В. М., Числов К. А.** Гравиметрическая интерпретация трехкомпонентного метода инерциальной навигации // Авиакосмическое приборостроение. 2009. № 6. С. 8—11.
7. **Девятисильный А. С., Числов К. А.** Численное моделирование задачи коррекции трехкомпонентной инерциальной навигационной системы по высотной информации // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2004. № 5. С. 101—105.
8. **Дьяконов В. П.** Вейвлеты. От теории к практике. М.: СОЛОН-Р, 2002. 448 с.

Д. Г. Грязин¹, д-р техн. наук, главный метролог,
gdg@mt.ifmo.ru,

А. И. Скалон², д-р техн. наук, зав. кафедрой,
vera@aanet.ru,

О. О. Величко¹, инженер,
vilka-st@mail.ru,

А. Б. Чекмарев¹, инженер,
chekmarev_ab@yandex.ru,

¹ ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор"

² Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Опыт аттестации трехосного поворотного станда фирмы Acutronic

Рассмотрены особенности конструкции, системы управления и позиционирования трехосного поворотного станда Acutronic AC3367-TCC и описаны работы по его аттестации, выполненные метрологической службой ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор".

Ключевые слова: аттестация, трехосный станд, позиционирование, ортогональность осей, угловая скорость

Введение

Производство новых высокотехнологичных навигационных приборов связано с необходимостью использования современного испытательного оборудования. Как правило, такое оборудование производится иностранными изготовителями. Отметим, что в соответствии с требованиями ГОСТ Р 8.568—97 [1] любое импортное оборудование должно пройти метрологическую аттестацию в Российской Федерации, проводимую службой, имеющей аккредитацию на проведение соответствующих работ.

Следует отметить, что номенклатура характеристик стандов, сертифицируемых фирмами-изготовителями, не всегда соответствует нуждам потребителя. В связи с этим организации, использующие это оборудование, вынуждены выполнять аттестацию стандов по характеристикам, которые не нормируются изготовителем. При этом часть нормируемых характеристик является избыточной при применении стандов. Поэтому при аттестации выполняется оценка именно тех характеристик станда, в которых в наибольшей степени заинтересован потребитель.

В 2010 г. ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор" приобрел трехосный поворотный станд Acutronic AC3367-TCC [2]. В связи с требованиями [1] возникла необходимость в его аттестации. В данной статье описаны работы по метрологической аттестации станда Acutronic AC3367-TCC, выполненные метрологической службой ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор".

Станд AC3367-TCC

Станд Acutronic AC3367-TCC состоит из трехосного поворотного станда с термокамерой, системы управления движением ACUTROL® и силового шкафа с усилителями приводов. Общий вид станда приведен на рис. 1.

На рис. 2 приведена кинематическая схема трехосного станда. Он имеет внешнюю вертикальную ось, среднюю ось поперечных колебаний, ортогональную к внешней оси, и внутреннюю ось продольных колебаний с установленной на ней поворотной платформой. На каждой оси установлены безредукторный моментный двигатель ($D\theta$) и пара датчиков углового положения ($D\psi$), которая стыкуется с системой управления. Датчик грубого позиционирования используется для коммутации безщеточных двигателей, а датчик точного позиционирования точно измеряет положение и небольшие изменения в положении. Использование такой пары датчиков позволяет создать систему движения, которая обеспечивает высокую точность позиционирования, воспроизведения скорости и ее стабильность.

Контроллер позволяет реализовывать режимы эксплуатации, задаваемые пользователем с помощью сенсорного экрана, встроенного в приборную

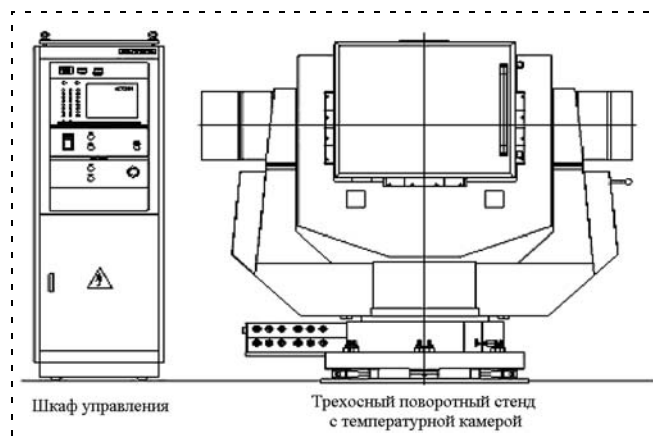


Рис. 1. Общий вид станда Acutronic AC3367-TCC

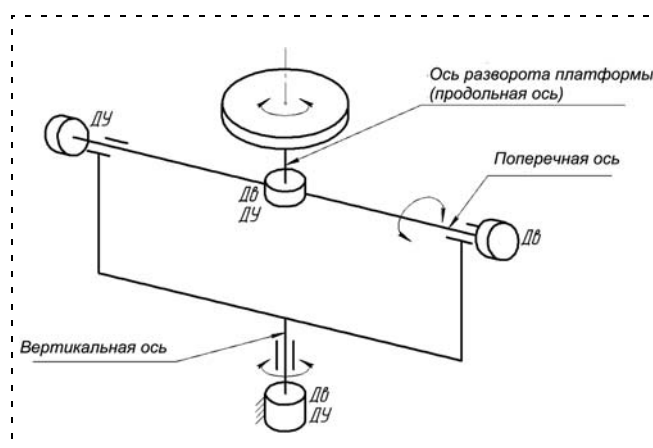


Рис. 2. Кинематическая схема станда

Таблица 1

Технические характеристики стенда

Характеристики		Внутренняя ось	Средняя ось	Внешняя ось
Позиционирование	Точность (СКО)	±1,5"	±1,5"	±1,5"
Угловая скорость	Диапазон макс. угловой скорости	±1000°/с	±500°/с	±500°/с
	Погрешность скорости по всем осям	Скорости >1°/с: 0,001 % ≤10°/с: 0,05 % ≤50°/с: 0,005 % ≤400°/с: 0,0005 % >400°/с: 0,0007 %		
	Стабильность по скорости по всем осям			
Ортогональность		±3"	±3"	

стойку. Аппаратура имеет встроенные функции самотестирования, а также прямой интерфейс для дистанционного управления с помощью внешней ЭВМ.

Технические характеристики стенда, заявленные фирмой Acutronic, представлены в табл. 1.

Работы по метрологической аттестации стенда

С учетом особенностей конструкции, системы управления и позиционирования стенда метрологической службой ЦНИИ "Электроприбор" были проведены работы по метрологической аттестации стенда: разработана программа и методика аттестации стенда, проведены испытания и обработка полученных данных, составлен протокол аттестации.

Для аттестации стенда необходимо было проверить на соответствие техническим характеристикам следующие параметры:

- ортогональности осей;
- точность позиционирования;

Таблица 2

Средства измерений, применяемые при аттестации стенда

Наименование средства измерений	Наименование измеряемой величины, единицы измерения	Тип средства измерений, его метрологические характеристики (пределы измерения, погрешность измерений)
Прецизионный электронный автоколлиматор Уровень электронный	Угол, °	ТА 500-57 Поле зрения: (0,37 × 0,28)° Погрешность: ±0,5"
	Угол, °	Talyvel 5 Диапазон: ±600" Погрешность измеренного значения: 0,2" ± 3 %
Частотомер	Период, с	СНТ-90 Диапазон: 3,3 нс...1000 с Погрешность опорного кварцевого генератора: 0,025 Гц
Призма многогранная	Угол, °	ПМ 4-36-0 Диапазон: 10...360° Предельное отклонение от номинального угла: ±5"

- погрешность воспроизведения и стабильность угловой скорости.

Для проверки точности позиционирования использовался прецизионный электронный автоколлиматор и 36-гранная призма класса точности 0 [3]; для определения погрешности воспроизведения угловой скорости и ее стабильности — частотомер; для проверки ортогональности осей — электронный уровень. Подробный перечень используемых средств измерений представлен в табл. 2.

Проверка точности позиционирования

Для проверки точности позиционирования внутренней оси была собрана установка в соответствии с рис. 3. На платформе стенда 1 была установлена 36-гранная призма 3 с регулируемым столом 2. На неподвижный регулируемый пьедестал 5 устанавливался электронный автоколлиматор 4 таким образом, чтобы образовалась оптическая связь автоколлиматора с первой отражающей гранью призмы.

При зафиксированном начальном нулевом положении первой отражающей грани призмы совершался один полный оборот платформы стенда с шагом 30°, при этом вертикальное отклонение от горизонтальной оси изображения креста, отраженного от каждой грани призмы, не должно было превышать 10". Регулировка отклонения осуществлялась с помощью трех котировочных винтов стола.

Проверка погрешности позиционирования внешней и средней осей проводилась аналогично проверке внутренней оси.

Погрешность позиционирования по каждой из осей стенда и среднеквадратичное отклонение рассчитывали, соответственно, по формулам

$$\Delta = \frac{x_{\text{зад}} - x_{\text{ср}}}{x_{\text{зад}}} \cdot 100 \% ; \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (x_{\text{ср}} - x_i)^2}{4}} , \quad (2)$$

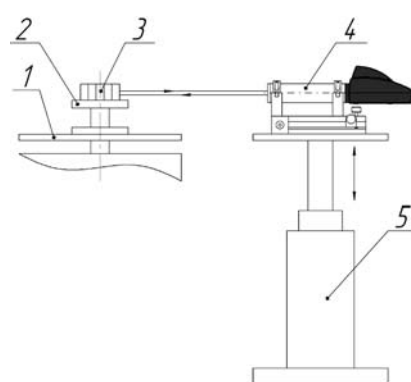


Рис. 3. Схема установки для проверки точности позиционирования

где $x_{\text{зад}}$ — задаваемое положение оси станда; x_i — измеренное положение оси станда; $x_{\text{ср}}$ — среднее значение измеренного положения оси станда после проведения серии из пяти испытаний.

Проверка погрешности воспроизведения и стабильности угловой скорости вращения осей станда

Для испытаний использовался частотомер, переведенный в режим измерения периода, который подключался к разъему на передней панели управления стандом. С помощью программы управления стандом задавали скорость вращения внутренней оси ($1000^\circ/\text{с}$), и с частотомера снимали данные о времени одного полного оборота с точностью до последнего знака. Далее измерения повторяли для скоростей $500^\circ/\text{с}$, $100^\circ/\text{с}$, $50^\circ/\text{с}$, $10^\circ/\text{с}$, $1^\circ/\text{с}$. Для средней и внешней осей измерения скоростей проводили, начиная со скорости $500^\circ/\text{с}$. Угловую скорость вращения рассчитывали на основании полученных данных по формуле

$$x_i = \frac{360^\circ}{T_i}, \quad (3)$$

где T_i — измеренное время совершения полного оборота.

Погрешность воспроизведения угловой скорости вращения каждой из осей станда и среднеквадратичное отклонение рассчитывали, соответственно, по формулам

$$\Delta = \frac{x_{\text{зад}} - x_{\text{ср}}}{x_{\text{зад}}} \cdot 100 \%; \quad (4)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (x_{\text{ср}} - x_i)^2}{4}}, \quad (5)$$

где $x_{\text{зад}}$ — задаваемая угловая скорость вращения оси станда; x_i — экспериментальная угловая скорость вращения оси станда; $x_{\text{ср}}$ — среднее значение экспериментальной угловой скорости вращения оси станда после проведения серии из пяти испытаний. Для определения стабильности воспроизведения угловой скорости по каждой оси для каждой задаваемой скорости рассчитывали среднее полученное значение и отклонение от него. Максимальное полученное отклонение определяло стабильность воспроизведения угловой скорости, которую рассчитывали по формуле

$$S = \max_{i=1...5} (x_{\text{ср}} - x_i), \quad (6)$$

где x_i — экспериментальная угловая скорость вращения оси станда; $x_{\text{ср}}$ — среднее значение для каждой задаваемой скорости по каждой оси станда после проведения серии из пяти испытаний.

Проверка неортогональности осей станда

Для проверки неортогональности осей станда использовали первичный преобразователь электронного уровня Talyvel 5 и кронштейн, входящий в стандартную комплектацию станда и изготовленный с высокой точностью.

При проверке неортогональности внутренней и средней осей кронштейн "закрепляли" на платформе станда, на котором, в свою очередь, закрепляли электронный уровень Talyvel 5 в соответствии с рис. 4, а.

С помощью системы управления все три оси станда устанавливали в нулевое положение, при этом первичный преобразователь был расположен вдоль средней оси. Показания с измерительного блока уровня снимали в нулевом положении внутренней оси и после поворота стола вокруг внутренней оси на 180° .

По результатам серии из пяти измерений вычисляли среднее значение угла для обоих положений (0° и 180°). Отклонение внутренней оси от вертикали (в положении средней оси 0°) определяли как полусумму средних значений угла для обоих положений (0° и 180°), при этом учитывали что при перевороте стола на 180° знак показания уровня при расчетах менялся на противоположный.

Далее, электронный уровень закрепляли на кронштейне в соответствии с рис. 4, б.

Установив среднюю ось станда в положение 180° , измерения повторяли, и вычислялось отклонение внутренней оси от вертикали в положении средней оси 180° .

Неортогональность внутренней и средней оси определяли как полусумму значений отклонения внутренней оси от вертикали в положении средней оси 0° и в положении средней оси 180° .

Проверку неортогональности внешней и средней осей проводили аналогичным образом. Выполняли

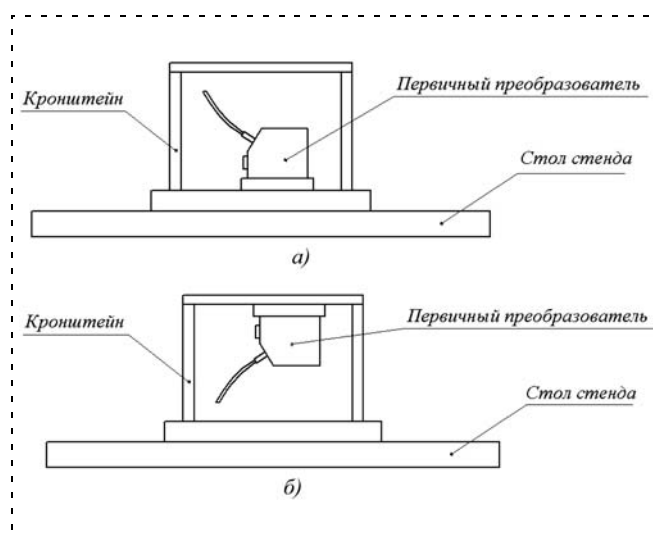


Рис. 4. Схема закрепления электронного уровня

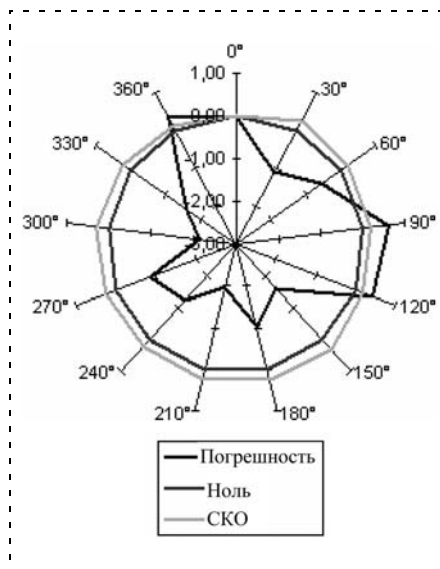


Рис. 5. Точность позиционирования внутренней оси стэнда

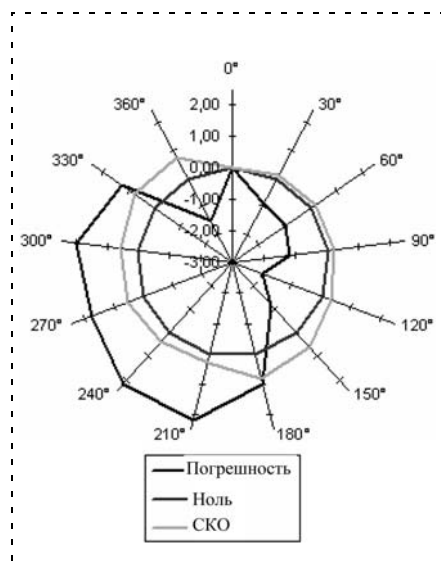


Рис. 6. Точность позиционирования средней оси стэнда

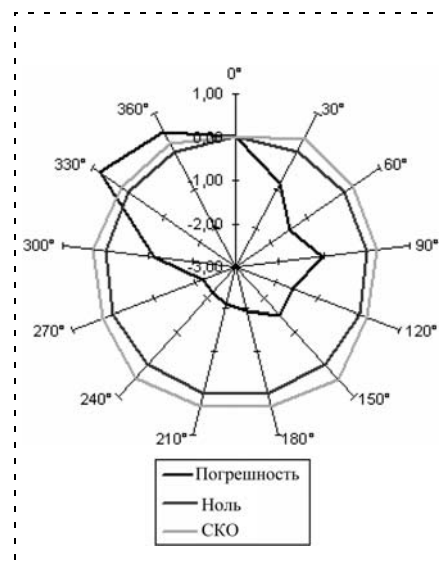


Рис. 7. Точность позиционирования внешней оси стэнда

Таблица 3

Стабильность воспроизведения угловой скорости для каждой из осей стэнда

Скорость вращения	1000°/с	500°/с	100°/с	50°/с	10°/с	1°/с
Внутренняя ось	0,00000002 %	0,00000003 %	0,00000325 %	0,00000243 %	0,00005837 %	0,00079767 %
Средняя ось	—	0,00000247 %	0,00000270 %	0,00000304 %	0,00004254 %	0,00022789 %
Внешняя ось	—	0,00000008 %	0,00000623 %	0,00000252 %	0,00002790 %	0,00036747 %

серию измерений для положений 0° и 180° внешней оси для двух положений средней оси (0° и 180°) и рассчитывали отклонение внешней оси от вертикали. Неортогональность осей определяли как полусумму значений отклонения внешней оси от вертикали в положении средней оси 0° и в положении средней оси 180°.

Заключение

После обработки всех данных, полученных в результате испытаний, был сделан вывод о том, что

трехосный поворотный стэнд имеет характеристики, которые полностью соответствуют заявленным фирмой-изготовителем:

- точность позиционирования для каждой из осей стэнда (рис. 5, 6, 7);
- погрешность воспроизведения и стабильность угловой скорости (рис. 8, табл. 3).

Таким образом, в результате проведенных метрологической службой ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор" работ впервые в отечественной практике было аттестовано такое сложное испытательное оборудование, как трехосный поворотный стэнд Acutronic AC3367-ТСС. При этом результаты аттестации полностью подтверждают заявленные характеристики.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ10-08-00190.

Список литературы

1. ГОСТ Р 8.568—97 ГСИ. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения.
2. URL: <http://www.acutronic.com>
3. ГОСТ 2875—88 Меры плоского угла призматические. Общие технические условия.

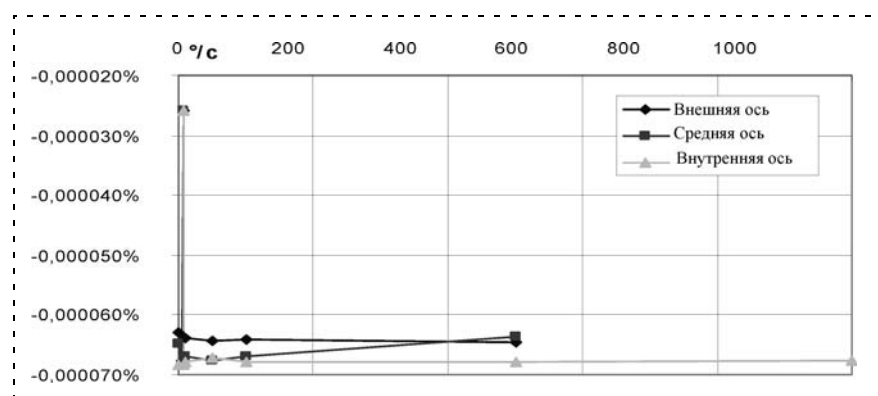


Рис. 8. Погрешность воспроизведения угловой скорости для каждой из осей стэнда

CONTENTS

Razorenov G. N. The Method of Synthesis of the Laws of "Soft" and "Supersoft" Final-State Control of Dynamic Systems 2

We consider the problem of synthesizing control laws for the final state of a dynamical system in an unconventional setting, when along with the boundary conditions for the parameters of the system are given by the boundary conditions for the control actions. Control laws that ensure zero control inputs at the endpoint, called the law a "soft" controls. Control laws, which provide zero values not only the control actions, but also a number of their successive time derivatives, called the law "supersoft" control. The practical usefulness of such laws in the control algorithms for aircraft and other types of objects shown in a number of papers listed in the bibliography.

Keywords: terminal control, terminal (final) state of the system and terminal (final) time, control laws open and closed type, the laws of "soft" and "supersoft" control

Furtat I. B. Consensus Control of Linear Dynamic Network on output with Compensation of Disturbances 12

The problem of robust control of linear dynamic network on the output was considered. During the solution a digraph where each vertex is associated with a corresponding network node is considered. This is network nodes are described by a priori parametrically and functionally uncertain linear differential equation with delay in state. The concept of ε -consensus is introduced. Algorithms of decentralized control are obtained. It provide ε -consensus of network and compensating unknown disturbances with the required accuracy. It is shown that the proposed scheme is valid for the network identified with the graph. Analytical results are illustrated in a numerical example of network consisting of four nodes.

Keywords: dynamic network, digraph, graph, consensus control, compensation of disturbances

Grigoriev S. N. Scientific and Technical Problems of Creation of the Modern Technological Systems with Numerical Program Control 19

The current state and perspectives of development of domestic systems of numerical program control (NPC) by technology equipment is considered. The attention is focused on the development of unique multifunctional import-replaced NPC systems of "Hi-End" class.

Keywords: technology equipment, systems NPC, class systems NPC "Hi-End"

Bobyry M. V. The Modified Algorithm of an is Fuzzy-Logic Inference 26

In article it is shown that at realisation of standard is fuzzy-logic algorithms of a inference there is a number of lacks which reduce speed of intellectual control systems on the theory fuzzy sets. It suggested allowing to raise the modified algorithm of an is fuzzy-logic inference speed at the expense of reduction of time by processing of empty results. The example explaining an essence of the developed algorithm is resulted. Work is executed with support grant of the President of Russian Federation MK-470.2009.8.

Keywords: fuzzy logic, fuzzy logic inference, automated control system

Nikitin Yu. R., Abramov I. V. Designing of CNC Machines, Diagnosing system 32

Three methods to organize the diagnosing process and the algorithm of diagnosing of CNC machines diagnosing system were considered in this paper. For calculating machine elements diagnosis intervals proposed to use the criterion, linking the level of responsibility of machine elements and the degradation processes rate.

Keywords: diagnosing system, CNC machines, organizing methods of diagnosing process, diagnosis intervals

Borovik S. Yu. System for Measuring of Blade Faces Displacements by the Instrumentality of Distributed Cluster of Single-Coil Eddy-Current Sensors. 36

The soft and hardware of the system for measuring of displacements of gas-turbine engine blade faces by the instrumentality of cluster of single-coil eddy-current sensors distributed over the engine stator is reviewed. The description of laboratory bench and analysis of experiment results are given.

Keywords: blade tips displacements, laboratory bench, cluster method, distributed cluster, measuring system, experimental check, results analysis

Korovin Ya. S., Khisamutdinov M. V. Image Filtering Providing Ellipse Assignment in Non-Contact Fuel Assemblies Height Detection System 42

A new method of ellipses search on the image is depicted in the paper. Digital image processing, median addition, Hough transformation and genetic algorithms are applied on the method's different stages. This algorithm is used in fuel assemblies height determination in the nuclear reactor core. The system was put into test operation on Volgodonsk nuclear power plant (JSC "Rosenergoatom").

Keywords: active zone, fuel assembly, a television camera, the median addition, Hough transform, genetic algorithms, mutation, crossing

- Kolodenkova A. E.** Multi-Fuzzy Approach for Estimation Alternatives Reality in the Mechatronic Systems Software 45
Actual problems of mechatronic systems software reality analysis are being considered. Different points of view on project reality problems in the conditions of uncertainty. The multi-fuzzy approach to a complex multiobjective reality estimation of mechatronic systems software on the basis of formation and a choice of comprehensible design alternatives has been considered.
Keywords: project development reality, design alternatives reality estimation, formation and choice of comprehensible alternatives, multiobjectiveness, multi-fuzzy approach
- Karsaev O. V., Konushiy V. G., Tihomirov V. V., Trotckiy D. V.** Multiagent System for Scheduling of Activity on Spaceport Baiykonur 53
The paper describes software program that realizes multiagent approach to task of strategic and operative scheduling of prepare and launch of carrier rockets on spaceport Baiykonur
Keywords: multiagent system, ontology, strategic scheduling, operative scheduling
- Zharkovskiy A.V., Lyamkin A. A., Trevgoda T. F.** Automation of the Process of Debugging of Software Complexes for Control Over Complicated Technical Systems 61
The informational model and the structure of automated tools for debugging of software complexes for control over complicated technical systems are proposed, the algorithm for search and localisation of errors at software debugging is given.
Keywords: informational model, structure, software complex, logbook, algorithm
- Sapunkov Ya. G., Molodenkov A. V.** Investigation of Special Control Mode in the Problem of the Optimal Turn of an Arbitrary Rigid Body (Spacecraft) 67
The problem of the optimal turn of a spacecraft as a rigid body with arbitrary dynamic configuration under arbitrary boundary conditions on the attitude and the angular velocity of a spacecraft in the quaternion statement is considered. The functional that combines the time and the integral value of the modulus of the control vector spent on the turn of a spacecraft is used as the optimality criterion. The investigation of a special control mode of a spacecraft is submitted.
Keywords: optimal control, special control mode, spacecraft, arbitrary rigid body
- Devyatisil'nyi A. S., Chislov K. A.** The Model of the Positionally Corrected Two-Dimension Graviinertial Navigation System on the Basis of D'Alamber Principle Interpretation 71
Short foundation of the physically and mathematically correct system for the identification of the object movement parameters and strength of the Earth gravitational field is given. The results of numerical research are shown.
Keywords: inertial navigation, satellite navigation system, gyroscope, newtonometer, correction, gravimetry, inverse problem, wavelet
- Gryazin D. G., Skalon A. I., Velichko O. O., Chekmarev A. B.** Certification of Three AXIS Motion Simulation Stem Acutronic 75
Concern CSRI Elektropribor, JSC has bought three axis motion simulation system Acutronic AC3367-TCC in 2010. According to the State Standard GOST R 8.568–97 certification of the system must be accomplished. This paper describes structural features of the motion system and the certification procedures developed by the metrological department in Concern CSRI Elektropribor, JSC.
Keywords: certification, three axis motion system, position, orthogonality, rate

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала: **(499) 269-5397**, тел./факс: **(499) 269-5510**

Дизайнер *Т. Н. Погорелова.*

Технический редактор *Е. В. Конова.* Корректор *М. Г. Джавадян.*

Сдано в набор 02.02.2011. Подписано в печать 17.03.2011. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
 Усл. печ. л. 9,8. Уч.-изд. л. 10,89. Заказ 201. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати,
 телерадиовещания и средств массовых коммуникаций
 Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика". 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, 15