

СОДЕРЖАНИЕ

Путов В. В., Козлов Ю. К., Казаков В. П., Путов А. В. Адаптивные электромеханические системы наведения и стабилизации специальных объектов и мобильных робототехнических комплексов	3
Бодунов Н. А. Частотные условия устойчивости для одного класса линейных периодических систем управления	8
Лукомский Ю. А., Стариченков А. Л. Прогнозирование устойчивости движения судов с динамическими принципами поддержания	13
Степанов И. В., Турусов С. Н. Комплекс моделей оценки технической готовности	17
Поляхов Н. Д., Приходько И. А., Нгуен Вьет Чунг. Исследование нечеткого управления движением надводного водоизмещающего корабля	24
Второв В. Б., Сяо Чэнлинь. О задаче робастного назначения полосов динамической системы	29
Клименков А. Г., Турусов С. Н., Чернышева Т. С. Методика построения математических моделей в задачах обеспечения конструктивной безопасности судов на подводных крыльях	36
Поляхов Н. Д., Приходько И. А., Поляхов Д. Н., Анушина Е. С., Шеина Е. Ю. Модель прогнозирования нагрузки электроэнергетической системы на основе нейронечеткого подхода	42
Степанов И. В. Оценка безопасности транспортных комплексов	48
Борцов М. Ю. Переход к тест-ориентированной разработке программного обеспечения	53

Редакционная коллегия:

В. В. Путов
(председатель),
В. Б. Второв
(ответственный за выпуск),
Ю. А. Борцов, Ю. А. Лукомский,
А. Г. Микеров, С. Н. Турусов

Редактор *Н. В. Лукина*
Комп. верстка *Е. Н. Паздникова*

Подписано в печать 11.06.04 г.
Формат 60x84 1/8.
Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».
Печать: ризограф.
Печ. л. 7,5.
Тираж 100 экз. Заказ 68.

Издательство
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

197376, Санкт-Петербург,
ул. Проф. Попова, 5

© СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2004

АДАПТИВНЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ НАВЕДЕНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ СПЕЦИАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ И МОБИЛЬНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Формулируются задачи повышения эффективности, динамической точности и быстродействия электромеханических систем наведения и стабилизации артиллерийских установок на подвижных платформах и мобильных робототехнических комплексов специального назначения. Предлагаются пути решения этих задач средствами адаптивного управления. Обсуждаются результаты исследования этих средств и применения в гироскопических системах наведения и стабилизации, выпускаемых ОАО «Ковровский электромеханический завод».

Динамическая точность, электромеханические системы наведения и стабилизации, мобильные робототехнические комплексы, адаптивное управление, гироскопические системы

Наиболее сложной и наукоемкой продукцией ОАО «Ковровский электромеханический завод» (ОАО «КЭМЗ»), конкурентоспособной на мировом рынке военной техники, являются системы гироскопической стабилизации и наведения артиллерийского и зенитно-ракетного вооружения, установленного на подвижных платформах. Основным режимом их применения является стрельба на ходу без снижения скорости, поэтому методы повышения точности и быстродействия процессов наведения и стабилизации артиллерийских установок средствами управления являются в то же время и методами повышения эффективности огня, не имеющими альтернативы.



Рис. 1. Танк с электромеханической системой наведения и стабилизации 2Э42-2 на полигонных испытаниях

Электромеханические двухкоординатные гироскопические системы моделей 2Э42–2, 2Э36–2 и 2Э52–2 для стабилизации и стабилизированного наведения в двух плоскостях пушек и спаренных с ними пулеметов используются, соответственно, на танках типа Т-72 и Т-90 (рис. 1) и на боевых машинах пехоты типов БМП-2 и БМП-3. Системы состоят из электродвигателей, управляющих микроконтроллерных блоков, гиротакметров и пультов управления. В них воплощены наиболее передовые технологии в области устройств гироскопической стабилизации.

скопической стабилизации и наведения, бортовых электромеханических преобразователей, силовой электроники и вычислительной техники бортового применения.

Одними из последних разработок ОАО «КЭМЗ», выполненных в сотрудничестве с ФСБ и МГТУ им. Н.Э. Баумана, являются применяемые в антитеррористических операциях модели мобильных робототехнических комплексов «Вездеход-ТМЗ» (рис. 2) и «Варан» (рис. 3). Оба изделия оснащены трехстепенными манипуляторами с высокоточными следящими электроприводами всех степеней подвижности. Такие комплексы предназначены:

- для дистанционной аудио- и видеоразведки объектов и территорий в условиях слабопересеченной местности и города, а также в помещениях;
- для осмотра днищ салонов и багажных отделений автотранспортных средств;
- для проведения взрывотехнических операций (доставка, установка и дистанционное приведение в действие разрушителей взрывоопасных устройств);
- для поиска и первичного диагностирования взрывоподозрительных предметов с помощью телекамер и спецоборудования и т. д.



Рис. 2. Мобильный робототехнический комплекс сверхлегкого класса «Вездеход-ТМЗ» (на колесном ходу)



Рис. 3. Мобильный робототехнический комплекс легкого класса «Варан» (на гусеничном ходу)

Главными причинами (факторами), препятствующими повышению быстродействия электромеханических следящих систем, ярко проявляющимися при двухплоскостной стабилизации и наведении наземных подвижных объектов, являются:

- колебания движущегося по пересеченной местности основания (наклон и рыскание), передающиеся на стабилизируемое оружие или инструмент в виде периодических возмущений;
- динамическое влияние колеблющегося основания на уравновешенные подвижные массивные части вооружения или инструмента и взаимовлияние друг на друга подвижных частей механизмов, относящихся к различным степеням подвижности;
- упругие деформации и зазоры редукторных передач и элементов конструкций, имеющих протяженную геометрию.

Среди вышеуказанных причин вынужденного снижения быстродействия и точности систем наведения одной из доминирующих являются упругие колебания – настоящий «бич» современной высокоэффективной техники. В многостепенных упругих механических

объектах с собственными частотами, лежащими в полосе пропускания исполнительных приводов, определяемой их предельно возможным быстродействием, они возбуждаются при любой попытке реализовать это предельное быстродействие в управлении, что приводит к снижению качественных показателей объектов, повышенному износу, поломкам и авариям. Отметим, что в силу приблизительно одинаковых прочностных требований к механическим конструкциям объектов значения низших собственных частот упругих колебаний в них всегда находятся в одних и тех же пределах 2–5 Гц независимо от их массогабаритных показателей. Таким образом, опасность возбуждения упругих колебаний препятствует любым попыткам реализовать потенциально высокие, перекрывающие эти пределы возможности быстродействия собственно исполнительных приводов и степеней подвижности управляемых объектов.

В то же время, построение подавляющего большинства современных систем автоматического управления подвижных объектов базируется на традиционной идеологии подчиненного управления. Подобное построение не учитывает проявления всех упомянутых ранее неидеальностей динамики многостепенных взаимосвязанных упругих механических объектов. Так, предельно возможное реализуемое в рамках подчиненного управления быстродействие, отвечающее идеализированному представлению механического объекта в виде жестко присоединенной к исполнительному приводу нагрузки с неизменной инерционной характеристикой, соответствует добротности (полосе пропускания) следящего контура не ниже 100 с^{-1} (16 Гц). Таким образом, при наличии упругих деформаций с частотами, лежащими в указанной выше области 2–5 Гц, реальная добротность следящих систем должна быть снижена до 0,5–1 Гц, т. е. более чем в 15–30 раз, с тем, чтобы не допустить возбуждения нежелательных упругих деформаций. При этом такое вынужденное снижение добротности следящих систем ухудшает реакцию систем на возмущения, что и приводит к большим динамическим ошибкам («провалам») систем в режимах стабилизации. Следовательно, современные исполнительные приводы в силу неполного использования их потенциальных возможностей создают необходимые предпосылки для совершенствования систем управления, исполнительным ядром которых они являются.

Другим необходимым условием совершенствования систем автоматического управления подвижными механическими объектами является переход от аналоговой элементной базы к современной высокопроизводительной вычислительной микроконтроллерной технике бортового применения. Это создает предпосылки для кардинального пересмотра традиционных методов построения систем управления подвижными объектами и перехода к более эффективным методам управления, реализуемым средствами вычислительной техники. Привлечение же современной вычислительной техники только для реализации традиционного подчиненного управления такими механическими объектами и игнорирование сложности их динамики является ничем не оправданным недостатком использования потенциальных возможностей современной бортовой вычислительной техники.

В Учебно-научном центре мехатронных комплексов подвижных объектов, созданном и оснащем объединением ОАО «КЭМЗ» на кафедре САУ СПбГЭТУ «ЛЭТИ», решаются задачи повышения эффективности указанных систем. Их решение рассматривается в рамках адаптивных бортовых систем автоматического управления, эффективных для

подавления упругих деформаций сложных механических объектов в условиях параметрической и функциональной неопределенности их математического описания и внешних возмущений. Указанные разработки базируются на предложенном профессором В. В. Путовым подходе к построению беспоисковых адаптивных систем с законами и алгоритмами адаптации, построенными на основе выдвинутого им метода приближенной аппроксимации неизвестных нелинейных описаний динамических объектов классами мажорирующих функций (метода мажорирующих функций) [1] – [4]. Авторами рассмотрены математические модели учета многорезонансных упругих деформаций взаимосвязанных механических объектов и проанализированы условия полной управляемости и наблюдаемости цепных конечномерных с сосредоточенными параметрами моделей многорезонансных упругих деформаций, обосновывающие применимость предлагаемых адаптивных систем. Ими разработаны практически реализуемые с помощью наблюдателей состояния структуры адаптивного управления с параметрической настройкой и мажорирующими функциями для многомассовых упругих механических объектов, обеспечивающие высокую эффективность решения задач наведения и стабилизации таких объектов в условиях их параметрической неопределенности, наличия зазоров в упругих связях, неполных измере-

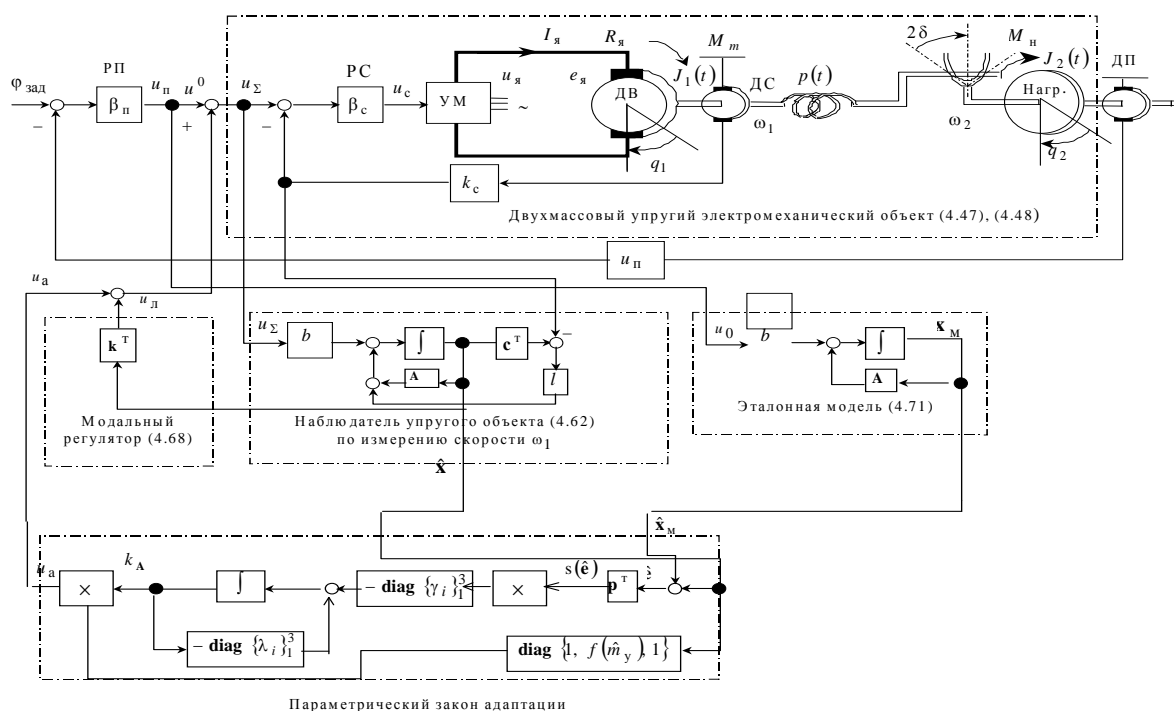


Рис. 4. Адаптивная с параметрической настройкой электромеханическая система управления объектом с упругой связью

ний состояния объектов и действий внешних возмущений в виде ударной нагрузки. В частности, авторами разработаны и исследованы два вида адаптивных электромеханических систем управления двухмассовым упругим нелинейным механическим объектом:

– по схеме адаптивного управления с параметрической настройкой, мажорирующей функцией, учитывающей нелинейность в виде зазора в упругой связи, и наблюдателем, реализующим построенное адаптивное управление по измерению одной переменной частоты вращения исполнительного электропривода (показана на рис. 4);

– по схеме адаптивного управления с сигнальной настройкой, мажорирующей функцией и наблюдателем, реализующим построенное адаптивное управление по измерению частоты вращения исполнительного привода (показана на рис. 5).

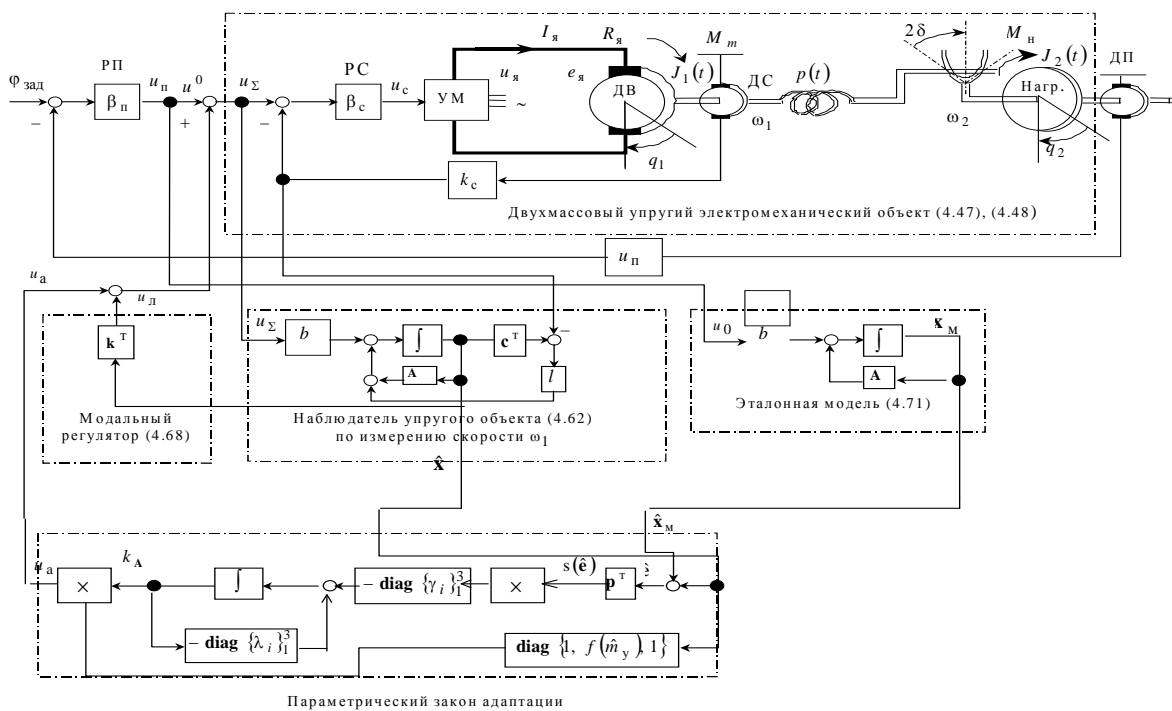


Рис. 5. Адаптивная с сигнальной настройкой электромеханическая система управления объектом с упругой связью

Как видно из приведенных рисунков, построенные адаптивные структуры выполнены в виде дополнительно подключаемых блоков, базирующихся на исходной двухконтурной системе подчиненного управления (без нарушения последней), а также обязательно содержат многоконтурный модальный регулятор, реализованный на основе встраиваемого наблюдателя и рассчитанный на эффективное подавление упругих деформаций только при некоторых усредненных параметрах линеаризованного упругого объекта.

Результаты проведенных авторами исследований предлагаемых адаптивных систем демонстрируют их высокую эффективность при решении задач подавления однорезонансных упругих деформаций в условиях широкого изменения параметров объектов и внешних возмущений. Очевидно, что подавление средствами адаптивного управления упругих однорезонансных деформаций с частотой, лежащей, как было указано выше, в пределах 2–5 Гц, позволяет реализовать добротность адаптивных следящих систем, указанных на рисунках 4 и 5, до значений, близких к указанному ранее пределу 16 Гц, допускаемому потенциальными возможностями подчиненного управления. Это означает, что применение адаптивного управления позволяет повысить добротность следящих систем объектов наведения не менее чем в 10–15 раз по сравнению с таковой в следящих системах с подчиненным управлением.

Авторами решены также вопросы цифровой реализации построенных адаптивно-модальных электромеханических систем наведения и стабилизации на базе бортовых микроконтроллерных средств экстремального применения, разрешенных для использования в специальных изделиях, выпускаемых ОАО «КЭМЗ», а также на базе микроконтроллеров семейства C-166 фирмы Infineon Technologies AG.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Путов В. В. Развитие беспойсковых адаптивных методов и их приложения к задачам управления сложными механическими объектами // Авиакосмическое приборостроение. 2003. № 6.
2. Путов В. В. Адаптивное управление динамикой сложных мехатронных систем // Мехатроника. 2000. № 1.
3. Путов В. В., Шелудько В. Н. Адаптивные системы управления нелинейными механическими объектами с многорезонансными упругими деформациями // Мехатроника. 2001. № 3.
4. Путов В. В. Адаптивное управление динамическими объектами: беспойсковые системы с эталонными моделями: Учебн. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2001.

V. V. Putov, Yu. K. Kozlov, V. P. Kazakov, A. V. Putov

ADAPTIVE ELECTROMECHANICAL SYSTEMS FOR POINTING AND STABILIZATION OF SPECIAL PLANTS AND MOBILE ROBOTIC COMPLEXES

The problems of a heightening of effectiveness of a dynamic accuracy and speed of electromechanical systems of induction and stabilization by artillery installations on relative frame platforms and mobile robot technical by complexes of special assignment are stated. The paths of a solution of these problems by tools of an adaptive technique are offered and some outcomes of their research and applications in gyroscopic systems of induction and stabilization emitted AG «Kovrov an electromechanical factory» are considered.

УДК 517.925.51

Н. А. Бодунов

ЧАСТОТНЫЕ УСЛОВИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ДЛЯ ОДНОГО КЛАССА ЛИНЕЙНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

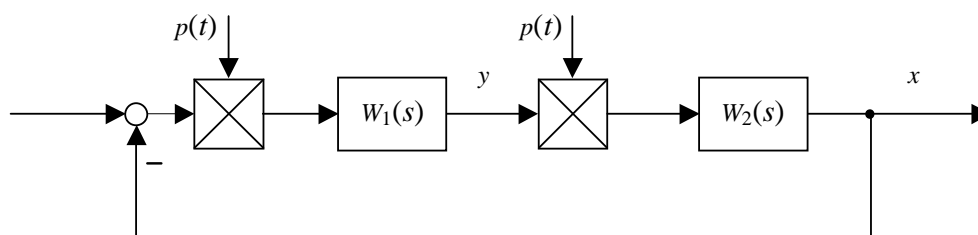
Рассматривается линейная периодическая система управления специального вида, передаточные функции которой имеют нулевые и чисто мнимые полюсы. Получены частотные условия асимптотической устойчивости и неустойчивости этой системы с использованием второго метода Ляпунова и частотной леммы Якубовича–Калмана.

Передаточная функция, функция Ляпунова, частотные условия устойчивости

Рассмотрим систему управления со структурной схемой, изображенной на рисунке.

Такая схема соответствует следящим системам переменного тока, состоящим из модулятора, усилителя модулированного сигнала с передаточной функцией $W_1(s)$, демодулятора и стационарной части с передаточной функцией $W_2(s)$.

Исследуем характер устойчивости этой системы в зависимости от вида передаточных функций $W_1(s)$ и $W_2(s)$, имеющих полюсы на мнимой оси, в предположении, что $p(t)$ – произвольная кусочно-непрерывная периодическая функция.



Пусть $W_1(s) = \frac{s}{Ts^2 + 1}$, $W_2 = \frac{k}{s}$. Если положить $Ty' + p(t)x = z$, то относительно фазо-

вых переменных x , y , z получаем нормальную систему дифференциальных уравнений вида

$$\begin{cases} x' = kp(t)y, \\ y' = -\frac{1}{T}p(t)x + \frac{1}{T}z, \\ z' = -y. \end{cases} \quad (1)$$

Производная положительно определенной функции Ляпунова $V = \frac{1}{k}x^2 + Ty^2 + z^2$ в силу системы (1) тождественно равна нулю, и по теореме Ляпунова [1, с. 238] эта система устойчива по Ляпунову, т. е. находится на границе устойчивости.

Пусть теперь $W_1(s) = \frac{s}{Ts^2 + 1}$, $W_2(s) = \frac{1}{s}W(s)$. Поставим следующую задачу: найти условия для $W(s)$, при которых рассматриваемая система переходит с границы устойчивости в асимптотически устойчивое либо неустойчивое состояние.

Будем считать, что $W(s) = \frac{Q(s)}{P(s)}$, где $P(s) = s^n + p_{n-1}s^{n-1} + \dots + p_1s + p_0$ – гурвицев полином, $Q(s) = q_{n+1}s^{n+1} + q_ns^n + \dots + q_1s + q_0$, $q_0 \neq 0$, полиномы $P(s)$ и $Q(s)$ несократимы, т. е. не имеют общих корней. Данная система описывается дифференциальными уравнениями

$$\begin{cases} x^{(n+1)} + p_{n-1}x^{(n)} + \dots + p_1x'' + p_0x' = q_{n+1}(p(t)y)^{(n+1)} + \\ + q_n(p(t)y)^{(n)} + \dots + q_1(p(t)y)' + q_0p(t)y, \\ Ty'' + y = -(p(t)x)'. \end{cases}$$

Полагая $w_1 = x - \frac{1}{p_0}u - q_{n+1}p(t)y$, $Ty' + p(t)x = v$, приведем эти уравнения к нормальной системе вида

$$\begin{cases} w' = Aw + p(t)y \left(c - \frac{q_0}{p_0}e \right), \\ u' = q_0p(t)y, \\ y' = \frac{1}{T}v - \frac{1}{T}p(t) \left(e^T w + \frac{1}{p_0}u + q_{n+1}p(t)y \right), \\ v' = -y, \end{cases} \quad (2)$$

где $w = [w_1 w_2 \dots w_n]^T$, $c = [c_1 c_2 \dots c_n]^T$, $e = [1 0 \dots 0]^T \in R^n$, A – матрица Фробениуса для полинома $P(s)$ [2, с. 262]. Постоянные c_1, c_2, \dots, c_n задаются рекуррентными формулами через коэффициенты полиномов $P(s)$ и $Q(s)$.

Для системы (2) ищем функцию Ляпунова в виде

$$V = w^T C w + \frac{1}{q_0 p_0} \frac{u^2}{2} + T \frac{y^2}{2} + \frac{v^2}{2},$$

где C – симметричная матрица порядка n . При выполнении условия

$$C \left(c - \frac{q_0}{p_0} e \right) = \frac{1}{2} e \quad (3)$$

производная функции V в силу системы (2) равна

$$V' = w^T \left(A^T C + CA \right) w - q_{n+1} p^2(t) y^2.$$

Из частотной леммы Якубовича–Калмана [3, с. 74] следует, что при условии

$$\operatorname{Re} \left[e^T (i\omega I - A)^{-1} \left(c - \frac{q_0}{p_0} e \right) \right] > 0, \quad \forall \omega \in R \quad (4)$$

существует положительно определенная матрица C , такая, что матрица $A^T C + CA$ является отрицательно определенной и выполнено условие (3). При этом функция V будет положительно определенной при $q_0 > 0$ и знакопеременной при $q_0 < 0$, а $V' \leq 0$ при $q_{n+1} \geq 0$. Исследуем множество $\{V' = 0\}$.

Предположим, что для любой функции $p(t)$ из класса кусочно-непрерывных периодических функций существует интервал (α, β) , где $p(t) \neq 0$ и $p(t) \neq \text{const}$.

Предположим теперь, что множество $\{V' = 0\}$ содержит целую положительную полутраекторию системы (2). Тогда на этой полутраектории $w \equiv 0$. Из первого уравнения системы (2) следует, что при $t \in (\alpha, \beta)$ $y \equiv 0$. Из остальных уравнений системы (2) легко находим, что при $t \in (\alpha, \beta)$ $u = \text{const}$, $v = \text{const}$,

$$v - p(t) \frac{u}{p_0} \equiv 0. \quad (5)$$

Поскольку при $t \in (\alpha, \beta)$ $p(t) \neq \text{const}$, условие (5) выполняется только при $u \equiv 0$, $v \equiv 0$. В силу единственности решений системы (2) на всей полутраектории должны выполняться тождества $w \equiv 0$, $y \equiv 0$, $u \equiv 0$, $v \equiv 0$. По теореме Красовского [3, с. 49] при $q_{n+1} \geq 0$ и выполнении условия (4) система (2) асимптотически устойчива при $q_0 > 0$ и неустойчива при $q_0 < 0$.

Если выполнено условие

$$\operatorname{Re} \left[e^T (i\omega I - A)^{-1} \left(c - \frac{q_0}{p_0} e \right) \right] < 0, \quad \forall \omega \in R, \quad (6)$$

то по лемме Якубовича–Калмана существует положительно определенная матрица H , такая, что выполнено условие $H \left(c - \frac{q_0}{p_0} e \right) = -\frac{1}{2} e$, а матрица $A^T H + HA$ является отрицательно определенной. Если взять $C = -H$, то C будет отрицательно определенной, а матрица $A^T C + CA$ – положительно определенной. Таким образом, если выполнено (6) и $q_{n+1} \leq 0$, то функция V оказывается знакопеременной, а $V' \geq 0$. Множество $\{V' = 0\}$ по-прежнему не содержит целых нетривиальных положительных полутраекторий системы (2), и по теореме Красовского эта система неустойчива.

Можно показать, что условие (4) сводится к условию

$$\operatorname{Re} \left[\frac{W(i\omega - W(0))}{i\omega} \right] > q_{n+1}, \quad \forall \omega \in R,$$

которое, в свою очередь, равносильно условию

$$W'(0) > q_{n+1}, \quad \operatorname{Im} \left[\frac{W(i\omega)}{\omega} \right] > q_{n+1} \quad \text{при } \omega > 0.$$

То же относится к условию (6) (знаки всех неравенств меняются на противоположные). Учитывая, что $q_{n+1} = W_2(+\infty)$ и $q_0 = p_0 W(0)$, $p_0 > 0$, получаем следующие условия устойчивости рассматриваемой системы.

Теорема 1. Если в рассматриваемой системе (см. рисунок) $W_1(s) = \frac{s}{Ts^2 + 1}$, $W_2(s) = \frac{1}{s} W(s)$, все полюсы $W(s)$ лежат в левой полуплоскости, $W_2(+\infty) \geq 0$ и

$$W'(0) > W_2(+\infty), \quad \operatorname{Im} \left[\frac{W(i\omega)}{\omega} \right] > W_2(+\infty) \quad \text{при } \omega > 0, \quad (7)$$

то система асимптотически устойчива при $W(0) > 0$ и неустойчива при $W(0) < 0$ для любой функции $p(t)$, имеющей интервал, где $p(t) \neq 0$ и $p(t) \neq \text{const}$.

Кроме того, система неустойчива при $W_2(+\infty) \leq 0$ и выполнении условий

$$W'(0) < W_2(+\infty), \quad \operatorname{Im} \left[\frac{W(i\omega)}{\omega} \right] < W_2(+\infty) \quad \text{при } \omega > 0. \quad (8)$$

Пример 1. Пусть

$$W(s) = \frac{\prod_{i=1}^n (T_{2i-1}s + 1)}{\prod_{i=1}^n (T_{2i}s + 1)}.$$

Проверка условий (7), (8) показывает, что если

$$\sum_{i=1}^n (T_{2i-1} - T_{2i}) > 0 \quad \text{и} \quad 0 < \sum_{i=1}^n [\operatorname{arctg}(T_{2i-1}\omega) - \operatorname{arctg}(T_{2i}\omega)] < \pi$$

при $\omega > 0$ (в частности, $T_1 > T_2 > \dots > T_{2n}$), то рассматриваемая система асимптотически устойчива. Если же

$$\sum_{i=1}^n (T_{2i-1} - T_{2i}) < 0 \quad \text{и} \quad -\pi < \sum_{i=1}^n [\operatorname{arctg}(T_{2i-1}\omega) - \operatorname{arctg}(T_{2i}\omega)] < 0$$

при $\omega > 0$ (в частности, $T_1 < T_2 < \dots < T_{2n}$), то система неустойчива.

Пример 2. Пусть

$$W(s) = \left(\frac{T_1 s + 1}{T_2 s + 1} \right)^n.$$

Если

$$1 < \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} < \operatorname{tg} \frac{\pi}{n} + \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\pi}{n}}, \quad (9)$$

то система асимптотически устойчива. Если же

$$1 < \sqrt{\frac{T_2}{T_1}} < \operatorname{tg} \frac{\pi}{n} + \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\pi}{n}},$$

то система неустойчива. Заметим, что при $n = 3$ условие (9) принимает вид

$$1 < \frac{T_1}{T_2} < 7 + 4\sqrt{3}.$$

Пример 3.

$$W(s) = \frac{(T_1s+1)(T_3s+1)}{T_2s+1}, \quad T_3 > T_1.$$

Для такой функции условие асимптотической устойчивости (7) выполняется, если $0 \leq T_1 < T_2 < T_3$.

Пусть теперь в рассматриваемой системе $W_1(s) = \frac{T_1s^2+1}{s(T_2s^2+1)}$, $T_1 > T_2$, $W_2(s) = \frac{1}{s}W(s)$.

Аналогично предыдущему случаю можно показать, что при $W(s) = 1$ система находится на границе устойчивости. Если, как и прежде, $W(s) = \frac{Q(s)}{P(s)}$, полиномы $P(s)$ и $Q(s)$ имеют указанный ранее вид, то получаем следующую нормальную систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} w' = Aw + p(t)y \left(c - \frac{q_0}{p_0} e \right), \\ u' = q_0 p(t)y, \\ y' = \frac{1}{T_2} v - \frac{T_1}{T_2} p(t) \left[e^T w + \frac{1}{p_0} u + q_{n+1} p(t)y \right], \\ v' = z, \\ z' = -\frac{1}{T_2} v - \left(1 - \frac{T_1}{T_2} \right) p(t) \left[e^T w + \frac{1}{p_0} u + q_{n+1} p(t)y \right], \end{cases} \quad (10)$$

где матрица A и векторы w , c , e – такие же, как в системе (2). Для системы (10) функция Ляпунова ищется в виде

$$V = w^T C w + \frac{1}{q_0 p_0} \frac{u^2}{2} + yz + \frac{y^2}{2} + \frac{T_1}{T_1 - T_2} \frac{z^2}{2} + \frac{1}{T_1 - T_2} \frac{v^2}{2}.$$

Повторение рассуждений предыдущего случая и изучение структуры множества $\{V' = 0\}$ приводит к следующему результату.

Теорема 2. Если $p(t)$ – произвольная периодическая кусочно-непрерывная функция, которая на некотором интервале времени (α, β) удовлетворяет условию $T_1 p''(t) + p(t) \neq 0$,

то рассматриваемая система (см. рисунок) с $W_1(s) = \frac{T_1s^2+1}{s(T_2s^2+1)}$, $T_1 > T_2$, $W_2(s) = \frac{1}{s}W(s)$

асимптотически устойчива, либо неустойчива при тех же ограничениях на функцию $W(s)$, что и в теореме 1.

Заметим, что условие $T_1 p''(t) + p(t) \neq 0$ означает, что $p(t) \neq \alpha_1 \cos \frac{t}{\sqrt{T_1}} + \alpha_2 \sin \frac{t}{\sqrt{T_1}}$

ни при каких α_1, α_2 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демидович Б. П. Лекции по математической теории устойчивости. М.: Наука, 1967.
2. Поляк Б. Т., Щербаков П. С. Робастная устойчивость и управление. М.: Наука, 2002.
3. Руш Н., Абетс П., Лалуа М. Прямой метод Ляпунова в теории устойчивости. М.: Наука, 1980.

Bodunov N. A.

FREQUENCY CONDITIONS FOR STABILITY OF ONE CLASS OF LINEAR PERIODIC CONTROL SYSTEMS

A linear periodic control system of special type is considered. It is assumed that transfer functions of the system have zero and pure imaginary poles. Frequency conditions for asymptotic stability and instability of this system are obtained using Liapunov's second method and the Yakubovitch–Kalman frequency lemma.

УДК 681.51 (075.8)

Ю. А. Лукомский, А. Л. Стариченков

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ СУДОВ С ДИНАМИЧЕСКИМИ ПРИНЦИПАМИ ПОДДЕРЖАНИЯ

Рассматриваются математические модели движения судов на воздушной подушке и подводных крыльях. На основании исследования фазовых портретов горизонтального движения судна на воздушной подушке и продольного движения судна на подводных крыльях оценивается устойчивость рассматриваемых объектов.

Математическая модель движения, судно на подводных крыльях, судно на воздушной подушке, фазовый портрет динамической системы

Проблема безопасности движения морского подвижного объекта (МПО) непосредственно связана с его устойчивостью. Оценку устойчивости движения судна целесообразно осуществлять на основе анализа его фазового портрета, который позволяет определить области устойчивого и неустойчивого движений и, таким образом, прогнозировать возможность попадания судна в аварийные ситуации. Математически данная задача сводится к предотвращению возможности выхода изображающей точки фазового пространства, характеризующей текущее состояние рассматриваемого объекта, за границу области устойчивости, которая является функцией коэффициентов математической модели МПО [1]. Проблема прогнозирования устойчивости движения особенно актуальна для судов с динамическими принципами поддержания (СДПП), к которым относятся суда на подводных крыльях (СПК), суда на воздушной подушке (СВП) и экранопланы. Данный класс судов среди других МПО отличают:

- более высокие динамические характеристики и быстрое развитие аварийных ситуаций;
- сложное взаимное влияние кинематических параметров движения;

– разнообразие исполнительных органов (ИО) со сложным характером их взаимодействия и влияния на характер движения;

– распределенное воздействие гидродинамических сил и моментов.

Наряду с этими особенностями СДПП свойственны и общие свойства МПО:

– функционирование в условиях постоянно действующих и носящих случайный характер возмущающих воздействий окружающей среды;

– собственные нелинейные и нестационарные гидродинамические характеристики, проявляющиеся прежде всего при интенсивных ветроволновых возмущениях.

К настоящему времени полностью сформировался облик перспективного СПК – судна II поколения, оборудованного глубокопогруженным крыльевым комплексом (СПК с ГПК), выполненным по гидродинамической схеме «утка» с характерным для данной схемы соотношением подъемных сил, получаемых на носовом (НКУ) и кормовом (ККУ) крыльевых устройствах, равным 0,35:0,65 [2].

НКУ представляет собой стойку с закрылком (или поворотную стойку) и поворотным крылом с трапециевидными в плане консолями. ККУ имеет две стойки с крылом, средняя часть которого V-образная, прямоугольная в плане, а консоли – трапециевидные, обратной килеватости. Выбор данной схемы объясняется, с одной стороны, большей, чем при других возможных гидродинамических схемах, эффективностью ИО по управлению продольным движением, меньшим уровнем перегрузок и их лучшим распределением по длине судна, а с другой стороны – наличием достаточно эффективных ИО для управления боковым движением.

Выбранная гидродинамическая схема СПК с ГПК требует в дополнение к отмеченным свойствам СПК добавить еще одно важное свойство: отсутствие собственной устойчивости по высоте движения и крену. Это свойство обуславливает необходимость применения системы, обеспечивающей автоматическое управление подъемной силой на крыльевом комплексе.

Для управления параметрами пространственного положения СПК выбранной гидродинамической схемы имеет следующие исполнительные органы:

- закрылок стойки НКУ (руль направления),
- закрылки (правый и левый) НКУ,
- наружные закрылки (правый и левый) ККУ,
- внутренние закрылки (правый и левый) ККУ.

Углы поворота данных ИО образуют вектор управления:

$$u = [\delta_p, \delta_{нп}, \delta_{нл}, \delta_{кнп}, \delta_{кнл}, \delta_{квп}, \delta_{квл}]^T. \quad (1)$$

Этот вектор с учетом предположений об односторонне-синхронном отклонении правых и левых закрылков НКУ ($\delta_{нп} = \delta_{нл} = \delta_n$) и внутренних закрылков ККУ ($\delta_{квп} = \delta_{квл} = \delta_{кв}$), а также о равносторонне-синхронном отклонении правого и левого наружных закрылков ККУ ($|\delta_{кнп}| = |\delta_{кнл}| = \delta_{кн}$) преобразуется к виду:

$$u = [\delta_p, \delta_n, \delta_{кн}, \delta_{кл}]^T.$$

В соответствии с рекомендациями авторов работы [2] примем для рассматриваемой схемы СПК концепцию раздельного управления кинематическими параметрами про-

странственного движения. Согласно ей, параметрами продольного движения (высотой и дифферентом) управляют кормовые внутренние и носовые закрылки, а параметрами бокового движения (рысканьем и креном) – руль направления и кормовые наружные закрылки, соответственно. Принятая структура дает возможность рассматривать вектор управления u как состоящий из двух векторов: вектора управления продольным движением u_{Π} и вектора управления боковым движением u_{δ} :

$$u_{\Pi} = \begin{bmatrix} \delta_{\text{H}} \\ \delta_{\text{КВ}} \end{bmatrix}; u_{\delta} = \begin{bmatrix} \delta_{\text{P}} \\ \delta_{\text{KH}} \end{bmatrix}.$$

Анализ устойчивости продольного движения СПК будем выполнять с помощью линеаризованной модели вида

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega_z \\ \alpha \\ \Psi \\ Y_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{42} & a_{43} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_z \\ \alpha \\ \Psi \\ Y_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{\text{H}} \\ \delta_{\text{КВ}} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где ω_z – угловая скорость килевой качки, α – угол атаки, Ψ – угол дифферента, Y_g – ордината центра масс СПК, a_{ij}, b_{ij} – постоянные коэффициенты со следующими значениями:

$$\begin{array}{llll} a_{11} = -39.2 & a_{21} = 0.90 & a_{42} = -0.21 & b_{11} = 20.74 \\ a_{12} = -3.65 & a_{22} = -16.00 & a_{43} = 0.21 & b_{12} = -12.63 \\ a_{13} = -5.14 & a_{23} = -0.34 & & b_{21} = -1.83 \\ a_{14} = 55.30 & a_{24} = 13.40 & & b_{22} = -2.06. \end{array}$$

Для описания движения СВП в горизонтальной плоскости воспользуемся обобщенной нелинейной математической моделью морского подвижного объекта [5]:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega_y \\ \beta \\ \varphi \\ Z_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12}(\beta) & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{42} & a_{43} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_y \\ \beta \\ \varphi \\ Z_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{12} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta, \quad (3)$$

где ω_y – угловая скорость рыскания, β, φ, δ – углы дрейфа, курса и перекладки руля соответственно, Z_g – боковое отклонение a_{ij}, b_{ij} – числовые коэффициенты, значения которых приведены в таблице, причем коэффициент $a_{12}(\beta) = a_1 + a_2\beta + a_3\beta^2$ – полином, аппроксимирующий нелинейную гидродинамическую зависимость.

a_{11}	a_1	a_2	a_3	a_{21}	a_{22}	a_{42}	a_{43}	b_{11}	b_{21}
-0.0917	-2.778	-0.3472	17.083	1	-0.475	-3	3	0.764	0.075

Подставив значения коэффициентов в (2) и (3) и решив систему дифференциальных уравнений, мы можем построить фазовый портрет горизонтального движения СВП в плоскости параметров состояния (ω_y, β) и фазовый портрет продольного движения СПК с ГПК в плоскости параметров состояния (ω_z, α) .

Фазовый портрет горизонтального движения СВП (рис.1) содержит три особые точки равновесия: в начале координат находится «устойчивый фокус», а в I и III квадрантах – неустойчивые точки равновесия типа «седло». Следовательно, существует область устойчивого движения судна, ограниченная определенными значениями угла дрейфа β и скорости рыскания ω_y . Контролируя диапазон изменения этих кинематических параметров, можно прогнозировать возникновение аварийных ситуаций, связанных с потерей устойчивости. Отличительная особенность фазового портрета продольного движения СПК с ГПК (рис. 2) заключается в наличии одной неустойчивой точки равновесия. Неуправляемое движение этого типа МПО является неустойчивым. Движение по фазовым траекториям по направлению к точке балансирующего режима при ее достижении ведет к попаданию в «воронку», вызывая тем самым неограниченный рост значений кинематических параметров движения. Для обеспечения безопасности движения СПК с ГПК обязательно автоматическое управление подъемной силой на крыльевом комплексе с высокой надежностью. Это достигается многократным резервированием каналов управления.

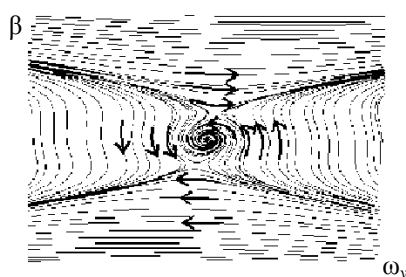


Рис. 1

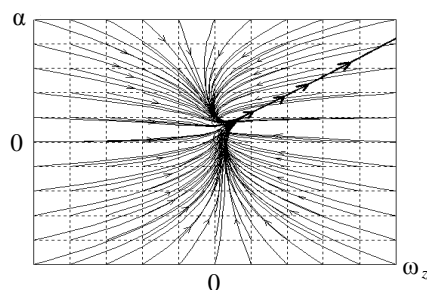


Рис. 2

Приведенные в литературе [3], [4] описания аварий и аварийных ситуаций при движении СВП и СПК подтверждают правильность теоретической трактовки этих процессов.

Аварийная ситуация при движении СВП начинается с увеличения угла и скорости рыскания ϕ , ω_y и сопровождается нарастанием угла дрейфа β . На последующих стадиях развития аварии наблюдается рост крена θ и дифферента ψ , которые приводят к опрокидыванию судна. Поэтому неизменными условиями безопасного маневрирования СВП являются снижение скорости судна перед выполнением маневра, увеличение диаметра циркуляции и уменьшение угла тяги винтов. Другими словами, нарушение устойчивого движения СВП в горизонтальной плоскости можно считать первопричиной возникновения аварийных ситуаций данного типа МПО.

Испытания СПК с ГПК на тихой воде и при волнении моря показали [2], что судно может идти на крыльях только при включенной системе управления движением. При этом на скорости хода 50 узлов оно движется со средней глубиной погружения НКУ 3,5–4,0 м и с дифферентом 2,5–3,0° на корму. При отключении системы управления судно уходит с курса и одновременно уменьшается клиренс, что свидетельствует о начале возникновения аварийной ситуации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стариченков А. Л. Эллиптическая аппроксимация границы области устойчивости бокового движения корабля на воздушной подушке // Навигация и управление движением. Сб. докладов I Науч.-тех. конф. молодых ученых, СПб., ЦНИИ «Электроприбор», 6–7 апреля 1999 г.
2. Колызаев Б. А., Косоруков А. И., Литвиненко В. А. Справочник по проектированию судов с ДПП. Л.: Судостроение, 1980.

3. Короткин И. М. Аварии судов на воздушной подушке и подводных крыльях. Л.: Судостроение, 1981.
4. Скороходов Д. А. Принципы формирования противоаварийных алгоритмов амфибийных судов на воздушной подушке // Сб. научн. трудов (ВВМИУ). Спец. выпуск, посвященный 70-летию д. т. н., проф. Р. А. Нелепина. СПб.: Пушкин, 1998.
5. Лукомский Ю. А., Стариченков А. Л. Общие закономерности и специфические особенности в математических моделях морских подвижных объектов // Гироскопия и навигация. 1997, № 2 (17). С. 44–52.

Yu. A. Lukomskiy, A. L. Starichenkov

PREDICTION OF MOTION STABILITY OF THE HOVERCRAFTS AND HYDROFOILS

Mathematical models of motion of the hovercrafts and hydrofoils are considered. The stability of considered objects is estimated on the base of researches of hovercrafts planar motion's and hydrofoils longitudinal motion's phase portraits.

УДК: 629.12.013/015

И. В. Степанов, С. Н. Турусов

КОМПЛЕКС МОДЕЛЕЙ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ГОТОВНОСТИ

Предлагается методика оценки готовности сложных организационно-технических систем. Рассматривается комплекс моделей, позволяющих решать задачи оценки технической готовности для отдельных технических средств, систем управления и комплексов технических средств. Выделяются два вида готовности технических средств – готовность к использованию и переходу.

Готовность, модельное обеспечение, модели готовности

Управление готовностью организационно-технических систем (ОТС) включает в себя оперативное управление персоналом [1] и комплексом технических средств (ТС), управление техническим обслуживанием и ремонтом, а также управление запасами ресурсов [3], [4]. Анализ состояния разработок в области управления готовностью показывает, что существующие и разрабатываемые системы обладают недостатками, ограничивающими их применение. Главным из них является отсутствие законченных разработок в области создания модельного обеспечения для таких систем. При решении задач управления готовностью серьезной проблемой является отсутствие стандартизированных критериев, позволяющих на основе единого подхода оценивать эффективность и уровень готовности разнородных элементов¹, входящих в состав ОТС.

ОТС можно представить как совокупность технической, организационной и интерфейсной структур, обеспеченных заданным объемом ресурсов для выполнения установленных функций. Организационная структура отражает взаимодействие персонала, управляющего сложным объектом, его соподчиненность и правила управления техникой. Являясь, в значительной мере, отражением технической структуры, она представляет собой набор ограничений на процесс эксплуатации ТС.

Техническая структура определяется функциями ОТС и включает в себя собственно технические средства, системы управления техническими средствами, а также каналы управления и передачи информации, составляющие комплекс. Интерфейсная структура обеспечивает взаимодействие организационной и технической структур ОТС. Она вклю-

¹ Различные по физическим принципам и быстрдействию технические средства и системы, персонал и т. д.

чает в себя специальные средства и методы, связывающие организационную и техническую структуры ОТС в единое целое: системы сбора, обработки и представления информации (средства индикации состояния объекта); системы поиска и представления вариантов управляющих решений лицу, принимающему решения; средства управления технической структурой (пульта управления). Интерфейсная структура ОТС включает в себя ряд специализированных технических средств, позволяющих оператору получать информацию о протекающих в технической структуре процессах и управлять работой элементов технической структуры. Это означает, что при анализе ОТС интерфейсную структуру можно рассматривать как специфический элемент технической структуры.

Готовность как показатель качества функционирования системы. Для оценки состояния отдельных элементов ОТС и системы в целом целесообразно использовать унифицированный критерий оценки качества функционирования системы. Подобный критерий представляет собой совокупность моделей оценки и системы шкал, позволяющую преобразовать вербальное или знаковое описание цели функционирования элемента ОТС в конкретные числовые значения показателя выполнения цели. В качестве такого показателя может, в частности, выступать готовность.

Готовность элементов ОТС следует рассматривать в двух аспектах [3], [4].

Готовность к использованию $g(t)$ – способность элемента ОТС к дальнейшей работе в текущем режиме с сохранением всех необходимых свойств системы. Она является оценкой способности выполнения установленных элементу функций в заданном объеме в момент времени t или в течение периода времени T .

Готовность к переходу – способность элемента ОТС переходить из одного (текущего) режима работы в другой. Она рассматривается как оценка способности элемента ОТС выполнить переход из одного режима эксплуатации (ψ_i) в другой (ψ_j) (или из текущего состояния в ожидаемое) за конечное время и с расходом ограниченного объема ресурсов. Готовность элемента ОТС к переходу будем обозначать $\Gamma(\psi_i \rightarrow \psi_j)$ или Γ_{ij} .

Большинство процессов в ОТС не могут быть описаны с достаточной точностью, поэтому имеет смысл говорить только об описании тенденций поведения ее элементов [2]. В процессе построения описаний исследуемых элементов ОТС заменяются моделью, исследование которой позволяет прогнозировать с определенной мерой достоверности изменение состояния данного элемента. Построение таких моделей возможно на базе вероятностного подхода.

Под *готовностью элементов ОТС* будем понимать гарантированную вероятность того, что рассматриваемый элемент способен выполнять свои функции или осуществить переход из одного состояния в другое.

Готовность ОТС (рис. 1) складывается из готовности технической структуры ОТС (технической готовности) и готовности организационной структуры (организационной готовности) [4]. Считается, что ОТС находится в состоянии готовности, если все элементы, входящие в ее состав обладают готовностью не ниже заданной, то есть находятся в состоянии готовности. Рассмотрим методику оценки готовности технической структуры.

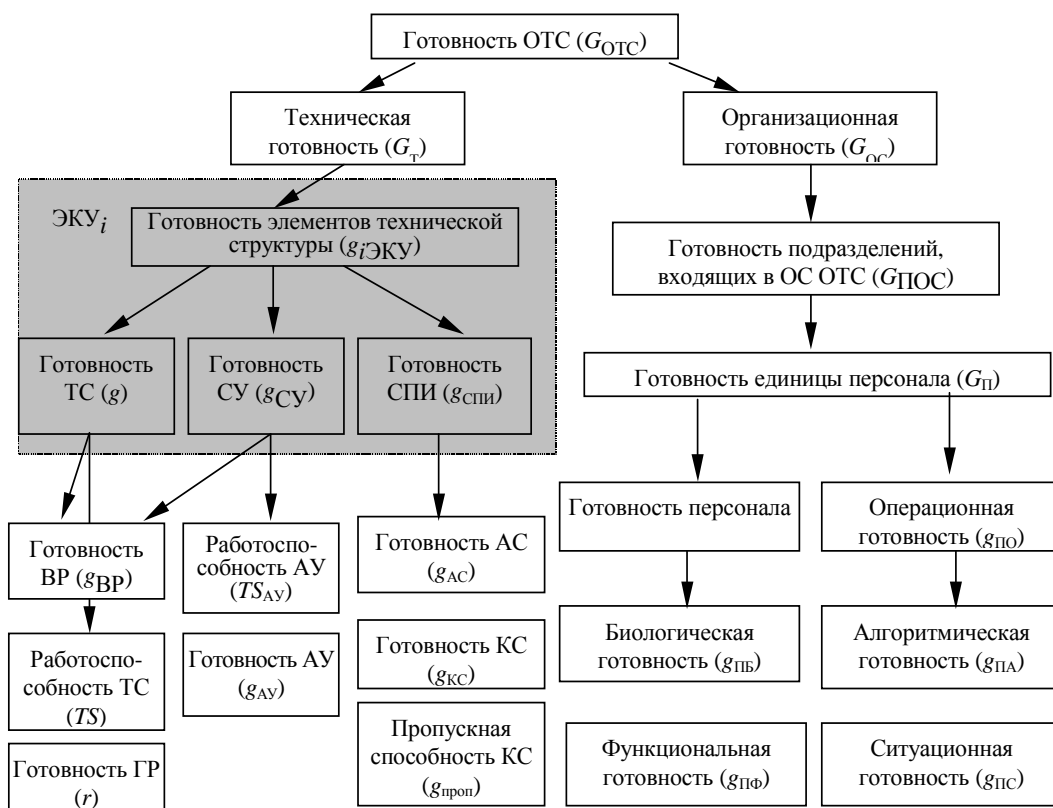


Рис. 1. Структура готовности организационно-технической системы

Готовность комплекса технических средств к использованию. В структуре комплекса технических средств (КТС) можно выделить три основные составляющие: ТС, системы управления ТС и системы передачи информации. Очевидно, что техническая готовность КТС определяется готовностью его составляющих – готовностью входящих в него отдельных ТС и систем управления ТС, а также готовностью систем передачи информации КТС. Рассмотрим содержание указанных составляющих.

Готовность технических средств определяется тремя факторами: работоспособностью или техническим состоянием ТС, готовностью главного ресурса ТС, готовностью вспомогательных или обеспечивающих ресурсов. *Главным ресурсом* (ГР) называется собственный расходуемый ресурс ТС, обеспечивающий его способность выполнять поставленные перед ним цели – время наработки на отказ, количество циклов использования, пробег и т. д. *Вспомогательными ресурсами* (ВР) называются ресурсы, обеспечивающие использование ТС по основному назначению – электроэнергия, масло, топливо и т. п.

Работоспособным называется такое ТС, все диагностические признаки которого находятся в допустимых пределах. Для оценки технического состояния ТС предлагается использовать *коэффициент технического состояния* (TS) – как показатель, характеризующий степень соответствия диагностических признаков y_i требованиям, предъявляемым к данному ТС:

$$TS(t) = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{\Delta y_i(t)}{\tilde{y}_i} \tau_i(t),$$

где y_i – диагностические признаки (ДП); τ_i – весовой коэффициент, отражающий вклад i -го ДП в оценку технического состояния ТС; \tilde{y}_i – медиана области допустимых значений

для i -го ДП; $\Delta y_i(t) = \left| y_i(t) - \tilde{y}_i' \right|$ – отклонение i -го ДП от медианы области допустимых значений; n – число учитываемых ДП.

Весовой коэффициент τ_i отражает важность i -го ДП и степень его влияния на техническое состояние рассматриваемого ТС. При определении τ_i возможен один из трех вариантов: все ДП являются равнозначными – $\tau_i(t) = 1/n = \text{const } \forall t, i = 1..n$, постоянными – $\tau_i(t) = \text{const } \forall t$ и $\exists \tau_i \neq \tau_j (\forall i \neq j)$ или изменяемыми.

Для изменяемых ДП возможно изменение значения τ_i с течением времени – $\tau_i(t) = \text{var}, t = \text{var}$ или при изменении значений ДП – $\tau_i(t) = \text{var}$, при $\left| y_i(t) - \tilde{y}_i' \right| = \text{var}$, $\forall i = 1..n$. Во втором случае значение весового коэффициента τ_i тем больше, чем больше отклонение значения y_i от медианы области допустимых значений для i -го диагностического признака.

Если значения всех ДП соответствуют номинальным значениям или близки к ним, то $TS(t) \rightarrow 1$ и ТС работоспособно. При снижении значения коэффициента технического состояния до минимально допустимого значения можно говорить, что ТС функционирует нештатно. При $TS(t) \rightarrow 0$ ТС полностью неработоспособно.

Готовность главного ресурса $r(t)$ есть вероятность того, что главный ресурс ТС будет достаточным для выполнения возложенных на него функций:

$$r(t) = EXP \left(\frac{1}{R^*} \sum_{j=1}^m \rho_j(T_j) \right),$$

где R^* – базовое (установленное при проектировании ТС) значение главного ресурса; T_j – время использования ТС в j -м режиме, характеризуемом интенсивностью расхода главного ресурса ρ_j ; m – число режимов использования ТС.

Готовность вспомогательных ресурсов есть вероятность того, что в любой момент времени t имеется достаточное для штатной работы ТС количество ВР. Готовность ВР является дискретной величиной, которая равна единице при $\tilde{R}_{ВР} \geq \tilde{R}_{ВР\text{доп}}$ и нулю в противном случае.

Значение $\tilde{R}_{ВР}$ определяется выражением $\tilde{R}_{ВР} = R_{ВР} - \Delta R_{ВР}(\rho_{ВР}) \cdot \Delta t - \alpha \cdot \Delta R_{ВР}(\rho_{ВР})$, где: $R_{ВР}$ – объем запаса ВР, реально имеющих в системе; $\Delta R_{ВР}(\rho_{ВР})$ – расход ВР в единицу времени с учетом режима использования ТС ($\rho_{ВР}$ – интенсивность расхода ВР в рассматриваемом режиме использования ТС); Δt – ожидаемое или фактическое время использования ТС; α – коэффициент потерь, характеризующий КПД ТС или возможные потери ВР в процессе их транспортировки, хранения и т. п.

Значение $\tilde{R}_{ВР}$ определяется выражением $\tilde{R}_{ВР} = R_{ВР} - \Delta R_{ВР}(\rho_{ВР}) \cdot \Delta t - \alpha \cdot \Delta R_{ВР}(\rho_{ВР})$, где: $R_{ВР}$ – объем запаса ВР, реально имеющих в системе; $\Delta R_{ВР}(\rho_{ВР})$ – расход ВР в единицу времени с учетом режима использования ТС ($\rho_{ВР}$ – интенсивность расхода ВР в рассматриваемом режиме использования ТС); Δt – ожидаемое или фактическое время ис-

пользования ТС; α – коэффициент потерь, характеризующий КПД ТС или возможные потери ВР в процессе их транспортировки, хранения и т. п.

Таким образом, *готовность ТС* есть вероятность того, что ТС способно выполнять установленные функции в заданном объеме и с заданным качеством:

$$g(t) = TS(t) \cdot r(t) \cdot g_{ВР}(t).$$

Готовность систем управления определяется аналогично готовности ТС и складывается из работоспособности и готовности аппаратуры управления, а также готовности ВР, обеспечивающих функционирование системы управления. *Готовность системы управления* есть вероятность того, что данная система способна решать возложенные на нее задачи управления в полном объеме, обеспечивая при этом требуемое качество управления:

$$g_{АУ}(t) = TS_{АУ}(t) \cdot r_{АУ}(t) \cdot g_{ВРАУ}(t),$$

где $TS_{АУ}(t)$ – коэффициент технического состояния аппаратуры управления; $r_{АУ}(t)$ – готовность аппаратуры управления; $g_{ВРАУ}(t)$ – готовность ВР аппаратуры управления.

Готовность систем передачи информации есть вероятность того, что системы и каналы связи, передачи информации и управления способны обеспечивать информационные потребности всех элементов, входящих в состав ОТС, с необходимыми полнотой и достоверностью. Готовность систем передачи информации определяется готовностью каналов связи, готовностью аппаратуры приема и аппаратуры передачи информации.

Готовность комплекса технических средств. Под готовностью комплекса технических средств или *технической готовностью* понимается способность элементов КТС сохранять свою готовность в допустимых пределах в течение определенного времени за счет возможности восстановления после сбоев и отказов, а также за счет проведения мероприятий по профилактике возможных отказов.

Для описания готовности КТС введем понятие элемента координированного управления. *Элементом координированного управления (ЭКУ)* будем называть структуру управления (рис. 2), включающую в себя одно или несколько технических средств, систему передачи информации и систему управления, решающую задачи управления подчиненными ей ТС.

КТС можно рассматривать как иерархию ЭКУ, включающую четыре основных уровня: ЭКУ нулевого уровня – локальные системы управления ТС; ЭКУ первого уровня – подсистемы (или группы ТС) КТС; ЭКУ второго уровня – системы КТС; ЭКУ третьего уровня – КТС как система координированного управления.

Готовность ЭКУ нулевого уровня $g_{ЭКУ_0}(t)$ можно определить как произведение готовностей элементов, входящих в состав ЭКУ:

$$g_{ЭКУ_0}(t) = g_{СУ}(t) \cdot g_{СПИ}(t) \cdot G(t),$$

где: $g_{СУ}(t)$ и $g_{СПИ}(t)$ – готовность систем управления и передачи информации; $G(t)$ – показатель готовности ТС, входящих в состав ЭКУ.

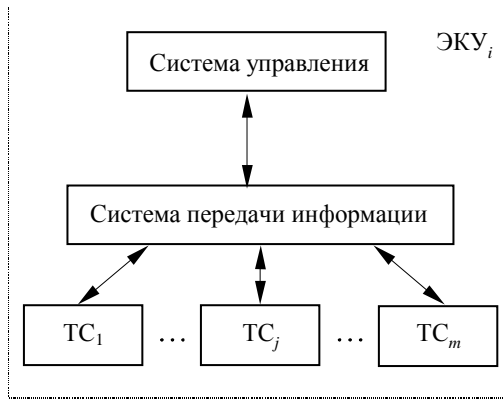


Рис. 2. Структура ЭКУ

Показатель готовности $G(t)$ определяется с учетом особенности структуры конкретного ЭКУ и зависит от наличия в ЭКУ резерва элементов и от состояния элементов, находящихся в резерве (холодный или горячий резерв). Например, для ЭКУ без резерва показатель $G(t)$ определяется как произведение готовностей $g_j(t)$ ТС, входящих в состав ЭКУ (m – число ТС в составе ЭКУ):

$$G(t) = \prod_{j=1}^m g_j(t).$$

Готовность ЭКУ i -го уровня иерархии ($\forall i = 1 \dots 3$), в общем случае, представляет собой композицию готовностей ЭКУ нижестоящего уровня. Например, готовность ЭКУ i -го уровня можно определять или как произведение всех готовностей ЭКУ нижестоящего уровня

$g_{\text{ЭКУ}_i}(t) = \prod_{j=1}^k g_{\text{ЭКУ}_{i-1}j}(t)$ или как минимальное значение готовности среди всех

ЭКУ нижестоящего уровня $g_{\text{ЭКУ}_i}(t) = \min\left(\left\{g_{\text{ЭКУ}_{i-1}j}(t)\right\}_{j=1}^k\right)$, где k – число ЭКУ ($i-1$)-го уровня, входящих в состав ЭКУ i -го уровня.

Таким образом, готовность КТС или техническая готовность определяется как композиция готовностей ЭКУ второго уровня (уровня систем КТС):

$$G_T(t) = g_{\text{ЭКУ}}^3(t) = g_{\text{ЭКУ}_1}^2(t) \cdot g_{\text{ЭКУ}_2}^2(t) \cdot \dots \cdot g_{\text{ЭКУ}_n}^2(t),$$

где: $g_{\text{ЭКУ}_j}^2(t)$ – готовности ЭКУ второго уровня (систем КТС) определяются как композиция всех входящих в его состав ЭКУ нулевого и первого уровней; n – число систем, входящих в состав КТС.

Комплексный показатель готовности. Комплексный показатель готовности включает в себя показатели готовности организационной, технической и интерфейсной структур. В общем виде он представляет собой композицию технической и организационной готовности при условии наличия необходимого для нормального функционирования ОТС запаса ресурсов $R(t)$:

$$G_{\text{ОТС}}(t) = (G_T(t) \cdot G_{\text{ОС}}(t)) R(t) \subset R_{\text{доп}}.$$

Таким образом, ОТС находится в состоянии готовности (способности выполнять установленные функции), в том и только в том случае, когда готовности организационной и технической структур лежат в области допустимых значений и имеется запас ресурсов $R(t)$, достаточный для эффективного функционирования системы.

Готовность элементов КТС к переходу из режима в режим. Каждый из трех основных режимов эксплуатации элементов КТС – использование по назначению; техническое обслуживание и ремонт; хранение – может быть разбит на ряд подрежимов. Каждый режим (подрежим) описывается функционалом $\psi_k = f(I_k, \tilde{R}_k, TS_k, t_k)$, где I_k, \tilde{R}_k, TS_k –

соответственно, вектор состояния элемента КТС, потребность или расход элементом КТС ресурсов и техническое состояние элемента КТС в момент времени t_k .

Способность элемента КТС к переходу из режима ψ_i в режим ψ_j определяется следующими основными факторами:

1. Существует поверхность $L(\psi)$, построенная в пространстве переменных $I_k, \tilde{R}_k, TS_k, t_k$, отражающая связь между различными режимами ψ_k , такая, что точки ψ_i и ψ_j принадлежат этой поверхности ($\psi_i, \psi_j \in L(\psi)$). Иначе говоря, существует принципиальная возможность перехода из режима ψ_i в режим ψ_j .

2. Время t_{ij} , затрачиваемое на выполнение перехода $\psi_i \rightarrow \psi_j$ – конечно и не превышает максимально допустимого времени перехода T ($t_{ij} < T$). Следует отметить, что в некоторых случаях время рассматривается как специфический вид ресурса.

3. Объем ресурсов R_{ij} , затрачиваемый на переход $\psi_i \rightarrow \psi_j$, ограничен и не превышает допустимого значения $R_{\text{пер}}$ ($R_{ij} < R$).

Готовность ТС к переходу одного режима или подрежима в другой определяется как вероятность одновременного свершения трех указанных событий. Полагая указанные события совместными и считая их условно независимыми [2], [3], готовность ТС к переходу Γ_{ij} можно записать как

$$\Gamma_{ij} = p[\exists L(\psi)(\psi_i, \psi_j \in L(\psi))] \cdot p[t_{ij} < T] \cdot p[R_{ij} < R].$$

Вероятности $p[t_{ij} < T]$ и $p[R_{ij} < R]$ можно полагать равными единице, если условия $t_{ij} < T$ и $R_{ij} < R$ выполняются, и равными нулю в противном случае.

Вероятность существования поверхности $L(\psi)$, удовлетворяющей условию $\exists L(\psi)(\psi_i, \psi_j \in L(\psi))$, определяется на основании соотнесения текущего состояния ТС, определяемого текущими значениями вектора состояния I_i и техническим состоянием ТС (TS_i), с тем состоянием, которое должно быть получено в результате перехода (I_j, TS_j). Для построения поверхности $L(\psi)$ может использоваться граф межрежимных переходов, который определяет все возможные режимы работы системы и допустимые переходы между ними. Если на графе существует хотя бы один путь, связывающий вершины ψ_i и ψ_j , можно говорить, что условие $\exists L(\psi)(\psi_i, \psi_j \in L(\psi))$ выполнено и считать, что $p[\exists L(\psi)(\psi_i, \psi_j \in L(\psi))] = 1$. В этом случае переход ТС из режима ψ_i в режим ψ_j возможен. В противном случае вероятность существования поверхности $L(\psi)$ равна нулю и, соответственно, переход из режима ψ_i в режим ψ_j невозможен. Это означает, что готовность ТС к переходу (Γ_{ij}) равна нулю.

Предлагаемые модели готовности позволяют с единых методологических позиций проводить анализ процессов, протекающих в технической структуре ОТС. Подобные модели могут применяться для оценки и прогнозирования состояния элементов комплекса технических средств.

Прогнозирование состояния ТС позволяет организовать систему обслуживания, сокращающую затраты ресурсов, исключить отказы и сбои в функционировании КТС, а также выявить «узкие» места в работе ОТС (например, недостаток запаса ресурса, тенденции к снижению работоспособности важных элементов и т. п.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукомская О. Ю., Степанов И. В., Турусов С. Н. Оценка готовности персонала при решении задач управления судовыми электроэнергетическими системами // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Сер. Автоматизация и управление. 2002, № 1. 2002. С. 11–15.
2. Гнеденко В. Б., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности. – М.: Наука, 1965.
3. Степанов И. В., Турусов С. Н. Принятие решений по управлению готовностью подвижных объектов // Тез. докл. XXV Всерос. конф. по управлению движением кораблей и специальных аппаратов (г. Рыбинск, 24–25 июня 1998 г.) / М. 1998. С. 57–72.
4. Степанов И. В., Турусов С. Н. Модельное обеспечение систем управления готовностью технологических комплексов // Сб. тез. докл., III Междунар. конф. и выставка по морским информационным технологиям (МОРИНТЕХ-99) Санкт-Петербург, 15–16 сент. 1999 г. СПб., 1999. Т. 2. С. 146–149.

I. V. Stepanov, S. N. Turusov

COMPLEX OF MODELS OF AN ESTIMATION OF TECHNICAL READINESS

A technique for estimation of readiness of composite organizing-technical systems is offered. The complex of models permitting to decide a problem of an estimation of technical readiness for separate means, management systems and complexes of means is considered. Two views of availabilities – readiness of means for usage and transition are excreted.

УДК 681.51

Н. Д. Поляхов, И. А. Приходько, Нгуен Вьет Чунг

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЧЕТКОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ НАДВОДНОГО ВОДОИЗМЕЩАЮЩЕГО КОРАБЛЯ

Рассмотрены вопросы построения нечеткого управления движением надводного водоизмещающего корабля по траектории. С учетом неопределенности модели корабля выполнена оценка традиционных линейных методов построения законов управления и обоснован выбор нечеткого подхода. Разработан и исследован нечеткий регулятор. Показана эффективность нечеткого управления динамикой корабля по сравнению с оптимальным управлением при ограниченных вариациях параметров модели корабля.

Надводный водоизмещающий корабль, нечеткий регулятор

Надводный водоизмещающий корабль (НВК) является сложной инерционной системой ([1], [2]), параметры которой существенно изменяются в процессе эксплуатации при изменении скорости и загрузки (осадки). Это ограничивает возможность выбора структуры системы и типа корректирующих устройств. При исследовании и расчете систем автоматического управления НВК необходимо знать численные значения гидродинамических параметров объекта и пределы их изменений в зависимости от скорости движения судна и его загрузки (осадки) [1].

Математическая теория оптимизации (линейное и нелинейное программирование, оптимальное управление) реализует совокупность методов [2], помогающих при использова-

нии современных пакетов моделирования эффективно принимать решения при фиксированных и известных параметрах, характеризующих исследуемый процесс. Основные трудности проявляются тогда, когда параметры обстановки оказываются неопределенными и когда они существенно влияют на результаты решения. Описание задачи в такой обстановке неизбежно содержит элементы неопределенности. Это приводит к соответствующим нечеткостям в решениях и рекомендациях по применению разработанных алгоритмов.

Наличие неопределенной или нечеткой информации [3], которая не может быть интерпретирована в вероятностных терминах, приводит к тому, что традиционные количественные методы, используемые в теории автоматического управления, оказываются неприменимыми. В результате появляются трудности в формировании алгоритмов управления. Один из способов их преодоления состоит в использовании нечетких понятий и знаний, в проведении операций с использованием нечетких логических правил и в получении на их основе нечетких выводов, на базе которых формируются алгоритмы управления.

Появление нечетких регуляторов (НР) на базе теории нечеткого управления определяет практические возможности их применения для целей автоматического управления движением НВК.

Линеаризованная математическая модель горизонтального движения НВК в окрестностях балансировочных режимов при отсутствии ветроволновых возмущений имеет следующий вид [4]:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi \\ \omega \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & a_{22} & a_{23} \\ 0 & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi \\ \omega \\ \beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_{21} \\ b_{31} \end{bmatrix} \delta, \quad (1)$$

где φ – значение истинного курса; $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$ – угловая скорость рыскания; β, δ – углы дрейфа и перекадки вертикального руля; $a_{22}, a_{23}, a_{32}, a_{33}, b_{21}, b_{31}$ – коэффициенты математической модели, значения которых зависят от скорости хода НВК (изменением загрузки пренебрегается).

Уравнение бокового сноса z НВК: $\dot{z} = V_0(\beta - \varphi)$, где V_0 – установившаяся скорость хода НВК.

Пусть $e = G_1\varphi$, $de = G_2\beta + G_3\omega$ – входные сигналы, а v – выходной сигнал НР. Вектор коэффициентов $G = [G_1, G_2, G_3]$ можно рассчитать из уравнения Риккати

$$KA + A^T K - KBR^{-1}B^T K = -Q \quad (2)$$

и с помощью выражения оптимального закона управления

$$G = -R^{-1}B^T K, \quad (3)$$

где K – положительно определенное решение; R, Q – назначаемые как положительно определенные (часто диагональные) матрицы интегрального квадратичного функционала.

В нечеткой логике [3], [5], [6], [7] с переменным (e, de) ставится в соответствие ряд нечетких множеств (A_{1i}, A_{2i}), для которых характерны определенные значения по уровню: ОБ, ОС, ОМ – отрицательное большое, отрицательное среднее и отрицательное малое,

соответственно; ПБ, ПС, ПМ – положительное большое, положительное среднее и положительное малое соответственно; Н – нулевое значение.

Нечеткий регулятор построен на основе правил нечеткого логического вывода Такаги–Сугено [6]:

если e есть A_{1i} и de есть A_{2i} , то $v_i = b_{0i} + b_{1i}e + b_{2i}de$, где v_i – заключение i -го нечеткого правила, b_{0i}, b_{1i}, b_{2i} – параметры заключений нечетких правил.

При фаззификации выбрана гауссова функция принадлежности, которая задается выражениями [5]:

$$\mu(e) = \exp\left(-\frac{(e-c)^2}{\sigma}\right), \quad \mu(de) = \exp\left(-\frac{(de-c)^2}{\sigma}\right). \quad (4)$$

В качестве нечеткой операции «и» использована операция произведения; функция заключения i -го нечеткого правила задается в виде $\mu(v_i) = \mu_l(e) \mu_k(de)$, где $i = \overline{1, 49}, l = \overline{1, 7}, k = \overline{1, 7}$.

Детерминированное (четкое) управляющее воздействие определяется по формуле средневзвешенного значения $v = \frac{\sum \mu(v_i) v_i}{\sum \mu(v_i)}$. Параметры НР: параметры функций принад-

лежности нечетких множеств (ОБ, ОС, ОМ, ПБ, ПС, ПМ, Н) и параметры заключений нечетких правил определяются с помощью редактора ANFIS раздела Fuzzy пакета Matlab [5]. Параметры c, σ функций принадлежности (4) для входных переменных нечеткого регулятора e и de даны в табл. 1 и в табл. 2.

Таблица 1

e	c	σ
ОБ	22.56	-218.80
ОС	22.57	-165.70
ОМ	22.56	-112.50
Н	22.56	-59.39
ПМ	22.56	-6.26
ПС	22.56	46.87
ПБ	22.56	100.00

Таблица 2

de	c	σ
ОБ	19.92	-193.500
ОС	19.92	-146.600
ОМ	19.92	-99.710
Н	19.92	-52.810
ПМ	19.92	-5.913
ПС	19.92	40.980
ПБ	19.92	87.880

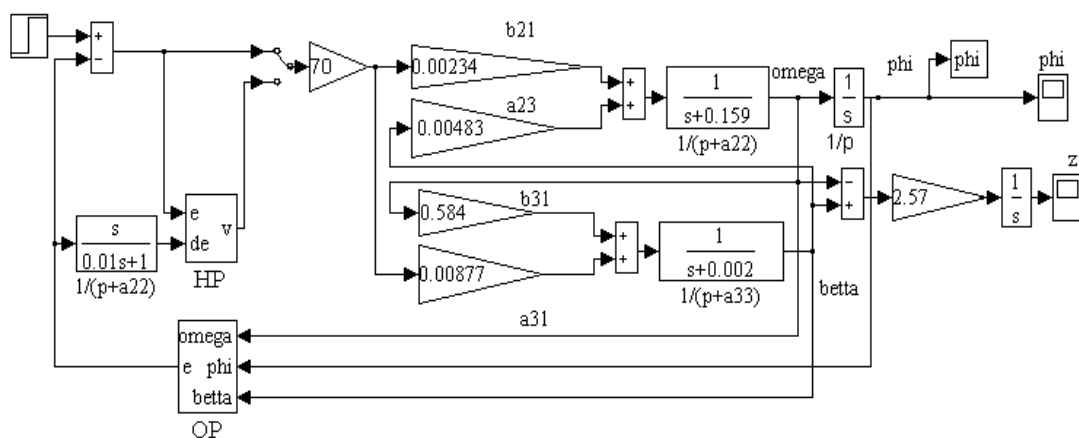


Рис. 1

На рис. 1 приведена структурная схема для исследования моделированием в среде Matlab/Simulink горизонтального движения НВК. Причем исследование нечеткого регулятора проводилось в сравнении с оптимальным линейным регулятором (на схеме нечеткий регулятор подключается к оптимальному). Оптимальный регулятор синтезирован по уравнениям (2) и (3). При расчете линейного оптимального регулятора использовался пакет Matlab/Optimization Toolbox. Параметры управляемого НВК (1) внесены в структурную схему.

Границы изменения входных переменных НР: $e - [-218.8 \ 100]$; $de - [-193.5 \ 87.88]$.

Изменение сигнала управления $v - [-199.6 \ 100]$. Нечеткие правила (v_i) приведены в табл. 3.

Таблица 3

e	de						
	ОБ	ОС	ОМ	Н	П	П	П
ОБ	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7
ОС	v_8	v_9	v_{10}	v_{11}	v_{12}	v_{13}	v_{14}
ОМ	v_{15}	v_{16}	v_{17}	v_{18}	v_{19}	v_{20}	v_{21}
e	de						
	ОБ	ОС	ОМ	Н	П	П	П
Н	v_{22}	v_{23}	v_{24}	v_{25}	v_{26}	v_{27}	v_{28}
П	v_{29}	v_{30}	v_{31}	v_{32}	v_{33}	v_{34}	v_{35}
П	v_{36}	v_{37}	v_{38}	v_{39}	v_{40}	v_{41}	v_{42}
П	v_{43}	v_{44}	v_{45}	v_{46}	v_{47}	v_{48}	v_{49}

Параметры заключений нечетких правил (v_i) даны в табл. 4.

Таблица 4

v	b_0	b_1	b_2
v_1	0.00015	0.39	-0.3357
v_2	-0.0008	0.122	0.3609
v_3	-0.002594	0.5675	0.1868
v_4	-0.002158	0.08644	0.002158
v_5	-0.0051	1.116	0.09789
v_6	-0.04932	0.01453	0.001274
v_7	0	0	0
v_8	-0.003817	-0.1088	0.01774
v_9	0.001943	-0.04133	-0.06983
v_{10}	-0.0001378	0.03461	0.009621
v_{11}	-0.0001426	0.03078	0.006042
v_{12}	-0.0003191	0.06981	0.006125
v_{13}	0	0.001	0
v_{14}	0	0	0
v_{15}	-0.0001976	0.07274	0.07567
v_{16}	0	-0.04356	-0.04527
v_{17}	-0.001816	-0.0537	-0.04932
v_{18}	0.003966	-0.154	-0.1863
v_{19}	-0.00086	0.02825	0.02573
v_{20}	0	0	0
v_{21}	0	0	0
v_{22}	0	-0.00011	-0.00012
v_{23}	0.0001	-0.0187	-0.0203
v_{24}	0.01161	-0.009217	-0.06553
v_{25}	-0.1517	0.9911	-0.9907

v	b_0	b_1	b_2
v_{26}	0.07978	0.9821	-0.9543
v_{27}	0.01593	-0.09313	0.1852
v_{28}	0	-0.001	-0.00136
v_{29}	0	0	0
v_{30}	0	0	0
v_{31}	0.0023	-0.1684	-0.203
v_{32}	0.314	0.9685	-0.9786
v_{33}	0.0137	1.011	-1.009
v_{34}	0.1254	1.008	1.004
v_{35}	-0.01461	0.04344	0.3357
v_{36}	0	0	0
v_{37}	0	0	0
v_{38}	0	0.00012	0.0001
v_{39}	0.0178	0.1409	0.2271
v_{40}	0.05916	0.9907	0.9819
v_{41}	-0.2017	1.001	-0.9935
v_{42}	0.1017	0.9359	0.9421
v_{43}	0	0	0
v_{44}	0	0	
v_{45}	0	0.00033	
v_{46}	0.01175	1.174	0.1318
v_{47}	0.0086	0.9968	0.9834
v_8	0.03889	0.9992	-0.9997
v_{49}	-0.1969	1.005	-1.002

Для сравнительной оценки эффективности работы регуляторов при изменении параметров объекта управления варьировались постоянные времени апериодических звеньев

модели корабля (увеличение и уменьшение в 5 раз). В исходном режиме и при уменьшении постоянных времени введение НР не дает заметного улучшения переходных процессов. При увеличении постоянной времени наличие НР позволяет повысить качество управления (НР: время регулирования $t_p = 9.38$ с, перерегулирование $\sigma = 0$; ОР: $t_p = 43.4$ с, $\sigma = 43.4$ %). Кривые переходных процессов показаны на рис. 2.

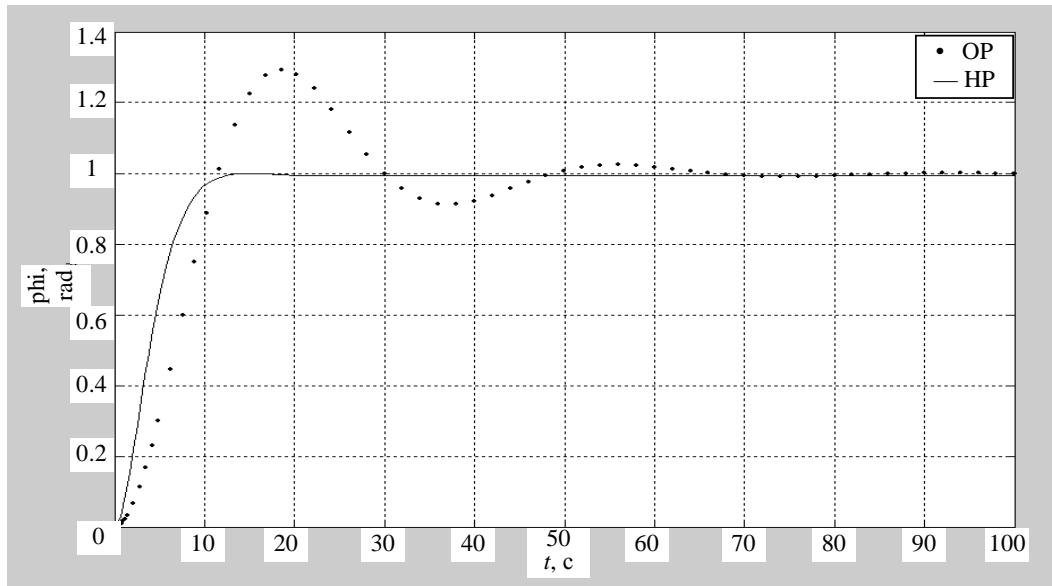


Рис. 2

Заключение. Результаты исследования моделированием в непрерывном времени показали существенное преимущество в эффективности нечеткого подхода в управлении динамикой корабля по сравнению с линейным оптимальным регулятором. Реализуемость нечеткого регулятора не вызывает практических затруднений, поскольку имеется широкая номенклатура нечетких микроконтроллеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Березин С. Я., Тетюев Б. А. Системы автоматического управления движением судна по курсу. Л.: Судостроение, 1990.
2. Бабаев А. М., Подвысоцкий И. В. Дискретная система управления судном с использованием микропроцессора // Автоматизация судовых технических средств: Науч.-техн. сб. ОГМА. Вып. 1. Одесса, 1993.
3. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления: Учеб. / Под ред. Н. Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002.
4. Лукомский Ю. А., Корчанов В. М. Управление морскими подвижными объектами. СПб.: Элмор, 1996.
5. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2003.
6. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control//IEEE Trans. on Syst., Man and Cybernetics. 1985.Vol. 15, № 1, January/February. P. 116–132.
7. Поляхов Н. Д., Приходько И. А. Нечеткие системы управления: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, 2003.

N. D. Polyakhov, I. A. Prikhodko, Nguen Viet Chung

THE RESEARCH OF FUZZY CONTROL OF THE SURFACE SHIP MOVEMENT

The design of fuzzy control of the surface ship on a trajectory is considered. In view of model uncertainty of the ship the estimation of traditional linear methods of control laws design is resulted and the substantiation in a choice of the fuzzy approach is given. The fuzzy controller is developed and investigated. Efficiency of fuzzy control is shown given dynamics changes at the limited variations of parameters of ship model in comparison with optimal control.

О ЗАДАЧЕ РОБАСТНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПОЛЮСОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Для линейной стационарной системы с одним входом и линейной обратной связью по состоянию рассмотрена задача такого назначения полюсов, при котором ограниченные параметрические возмущения не выводят эти полюсы за пределы некоторой области. Предложено обобщение известного решения этой проблемы, предполагающего задание биномиального характеристического полинома, на полиномы любого типа, в частности полиномы Баттерворта.

Модальное управление, интервальный полином, робастное качество, теорема Руше

Модальное управление принадлежит к числу наиболее часто применяемых в линейных стационарных системах законов управления. Если вектор состояния объекта управления может быть измерен или восстановлен, то модальный регулятор легко рассчитать аналитически или на ЭВМ (в системе Matlab это делается с помощью функций *place* или *acker*). Управление частью полюсов системы в случае неполных измерений – также хорошо разработанная процедура [1]. Некоторые практические вопросы обеспечения, наряду с заданным спектром матрицы, желаемого коэффициента передачи системы с модальным регулятором или придания ей астатизма рассмотрены в [2], [3].

В стандартной постановке задача назначения (размещения) полюсов выглядит следующим образом [4].

Дана динамическая система – объект управления

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}, \quad (1)$$

где $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$; $\mathbf{u} \in \mathbf{R}^r$; \mathbf{A}, \mathbf{B} – постоянные матрицы. Выбором матрицы обратной связи $\mathbf{K} \in \mathbf{R}^{r \times n}$ в законе управления

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{x} \quad (2)$$

собственные значения (с. з.) матрицы $\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}$ могут быть помещены в любые заданные точки комплексной плоскости (с тем ограничением, что комплексные с. з. образуют сопряженные пары) или, что то же самое, характеристический полином системы (1), (2) может быть сделан тождественно равным произвольному приведенному полиному n -й степени с вещественными коэффициентами тогда и только тогда, когда пара (\mathbf{A}, \mathbf{B}) полностью управляема.

Если объект (1) имеет один вход, то задача нахождения матрицы \mathbf{K} имеет единственное решение. Существует несколько алгоритмов ее нахождения.

1. «Естественный» алгоритм, предусматривающий определение элементов k_1, \dots, k_n

матрицы \mathbf{K} из системы n алгебраических уравнений $\gamma_i = \alpha_i$, $i = \overline{1, n}$, в которой $\gamma_1, \dots, \gamma_n$ – коэффициенты характеристического полинома системы

$$D(p) = \det(p\mathbf{I} - \tilde{\mathbf{A}}) = p^n + \gamma_1 p^{n-1} + \dots + \gamma_n, \quad (3)$$

линейно зависящие от искоемых параметров модального регулятора, а $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ – коэффициенты желаемого характеристического полинома

$$D_{\text{ж}}(p) = p^n + \alpha_1 p^{n-1} + \dots + \alpha_n.$$

2. Алгоритм [5], использующий преобразование подобия для представления системы в управляемом каноническом базисе: $\mathbf{K} = (\mathbf{a}^T - \mathbf{d}^T) \bar{\mathbf{P}} \mathbf{P}^{-1}$, где $\mathbf{a}^T = [\alpha_n, \dots, \alpha_1]$, $\mathbf{d}^T = [d_n, \dots, d_1]$ – векторы коэффициентов желаемого характеристического полинома системы с модальным регулятором и характеристического полинома объекта управления $D_{\mathbf{A}}(p) = \det(p\mathbf{I} - \mathbf{A}) = p^n + d_1 p^{n-1} + \dots + d_n$; $\mathbf{P} = (\mathbf{B} : \mathbf{A}\mathbf{B} : \mathbf{A}^2\mathbf{B} : \dots : \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B})$ – матрица управляемости для пары (\mathbf{A}, \mathbf{B}) ; $\bar{\mathbf{P}}$ – то же для пары $(\bar{\mathbf{A}}, \bar{\mathbf{B}})$, представленной в управляемом каноническом базисе, т. е. когда

$$\bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & : & \mathbf{I} \\ \dots & & \\ -\mathbf{d}^T & & \end{bmatrix}; \quad \bar{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \dots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

(здесь \mathbf{I} – единичная матрица $(n-1)$ -го порядка; $\mathbf{0}$ – нулевой столбец длиной $n-1$).

3. Алгоритм, использующий формулу Аккермана [6], идейно близкий к предыдущему алгоритму.

4. Алгоритм [7], являющийся модификацией алгоритма Фаддеева–Леверье для вычисления коэффициентов характеристического полинома по матрице системы.

Если объект управления имеет несколько входов, то задача нахождения матрицы обратной связи \mathbf{K} имеет бесконечное множество решений. Один из алгоритмов [8] предусматривает выполнение приведенной далее последовательности шагов:

а) задать матрицу \mathbf{A}_λ , такую, что ее спектр совпадает с заданным: $\Lambda(\mathbf{A}_\lambda) = \Gamma = \{\lambda_1, \dots, \lambda_n\}$; это означает, что существует неособенная матрица \mathbf{X} , удовлетворяющая соотношению $\mathbf{X}^{-1}(\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K})\mathbf{X} = \mathbf{A}_\lambda$;

б) задать произвольную параметрическую матрицу $\mathbf{G} \in \mathbf{R}^{r \times n}$;

в) решить уравнение $\mathbf{A}\mathbf{X} - \mathbf{X}\mathbf{A}_\lambda - \mathbf{B}\mathbf{G} = \mathbf{0}$ относительно \mathbf{X} ;

г) найти искомую матрицу обратной связи как $\mathbf{K} = \mathbf{G}\mathbf{X}^{-1}$ (обратимость \mathbf{X} гарантируется, если пара (\mathbf{A}, \mathbf{B}) полностью управляема, пара $(\mathbf{A}_\lambda, \mathbf{G})$ – полностью наблюдаема, а матрицы \mathbf{A} и \mathbf{A}_λ не имеют общих с. з.).

Другой алгоритм, предложенный в [9], реализован в системе Matlab функцией *place*.

Если фактические параметры объекта управления отличаются от расчетных значений (например, сравнительно медленно меняются в процессе работы системы или постоянны, но точно не известны), то действительное расположение полюсов системы с модальным регулятором также будет отличаться от расчетного. Если эти отличия превышают допустимые пределы, то могут быть применены адаптивные средства изменения (настройки) коэффициентов обратных связей k_1, \dots, k_n . Например, известен алгоритм

[7], предусматривающий идентификацию параметров объекта и, в соответствии со значениями последних, вычисление таких значений параметров модального регулятора, при которых полюсы системы удерживаются в назначенных позициях. Ввиду громоздкости этого алгоритма более предпочтительным кажется классический алгоритм параметрической адаптации с эталонной моделью [10], параметры которой задаются в соответствии с желаемой картиной расположения полюсов системы.

Часто полная компенсация параметрических возмущений адаптивными средствами является излишней, особенно если указанные возмущения сравнительно невелики. В этом случае возникают две различные, хотя и связанные между собой, задачи. Первая состоит в том, чтобы оценить, насколько сильно полюсы системы изменяются по сравнению с заданными (невозмущенными) значениями. Вторая задача – так назначить полюсы, чтобы при ограниченных параметрических возмущениях в объекте управления смещение этих полюсов не приводило к выходу их за пределы некоторой области в комплексной плоскости.

Пусть объект управления описывается уравнением (1), в котором, однако, матрица \mathbf{A} , хотя и постоянна, но зависит от неизвестного постоянного вектора δ физических параметров объекта: $\mathbf{A} = \mathbf{A}(\delta)$, $\delta = [\delta_1, \dots, \delta_m]^T$. Номинальное (используемое при расчете модального регулятора) значение матрицы \mathbf{A} обозначим $\mathbf{A}_0 = \mathbf{A}(\delta_0)$, где δ_0 – номинальное значение δ . Будем считать, что для каждого физического параметра объекта известны нижняя и верхняя границы интервала его значений: $\delta_j \in [\delta_j^-, \delta_j^+]$, $\delta_j^- \leq \delta_j^+$, $j = \overline{1, m}$, так что $\delta \in \Lambda$, где $\Lambda = \{\delta : \delta_j^- \leq \delta_j \leq \delta_j^+, j = \overline{1, m}\}$.

Поскольку коэффициенты полинома $D(p)$ являются композициями параметров объекта управления, то этот полином следует теперь рассматривать как интервальный полином с коэффициентами

$$\gamma_i \in [\gamma_i^-, \gamma_i^+], \gamma_i^- \leq \gamma_i^+, i = \overline{1, n}. \quad (5)$$

При этом границы интервалов определяются условиями $\gamma_i^- = \min_{\delta \in \Lambda} \gamma_i(\delta)$,

$\gamma_i^+ = \max_{\delta \in \Lambda} \gamma_i(\delta)$, $i = \overline{1, n}$ и, следовательно, могут быть найдены методами многопараметрической оптимизации, например с помощью пакета Optimization Toolbox системы Matlab.

Естественно, что семейство полиномов (3) должно удовлетворять, в первую очередь, требованию устойчивости. Исчерпывающий ответ на вопрос об устойчивости интервального полинома дают две теоремы Харитоновой [11]; из них наиболее удобна вторая («сильная») теорема, согласно которой гурвицевость всех полиномов вида (3) с коэффициентами, удовлетворяющими условиям (5), эквивалентна гурвицевости четырех «угловых» полиномов, определяемых некоторыми комбинациями значений γ_i^- и γ_i^+ . Данная задача является одним из аспектов проблемы *робастной устойчивости*.

В настоящей статье нас интересует более сильное свойство неопределенных систем, известное как *робастное качество*. Здесь мы рассматриваем один из его аспектов – проблему робастности полюсов системы, подверженной параметрическим возмущениям. Если желае-

мое распределение полюсов уже задано, а объект управления имеет несколько входов, то разумно использовать неединственность матрицы обратной связи для нахождения робастного решения. Один из алгоритмов, реализующих этот подход, предполагает минимизацию числа обусловленности матрицы \mathbf{X} , являющейся решением рассмотренного ранее уравнения $\mathbf{A}\mathbf{X} - \mathbf{X}\mathbf{A}_\lambda - \mathbf{B}\mathbf{G} = \mathbf{0}$, либо минимизацию улучшенного функционала [12] вида $\frac{\alpha}{2}(\|\mathbf{X}\|^2 + \|\mathbf{X}^{-1}\|^2) + \frac{1-\alpha}{2}\|\mathbf{K}\|^2$, в котором α – весовой коэффициент, $0 \leq \alpha \leq 1$. Другой алгоритм, реализованный в Matlab функцией *place*, минимизирует чувствительность полюсов системы к возмущениям матриц \mathbf{A} и \mathbf{B} . Если же объект имеет один вход (далее мы рассматриваем только этот случай), то, ввиду единственности матрицы обратной связи, рассматривать проблему робастности полюсов, желаемые значения которых уже заданы, можно лишь в плане анализа. Решение дается следующей теоремой [11], являющейся аналогом первой («слабой») теоремы Харитоновой: чтобы корни всех полиномов вида (3) с коэффициентами (5) лежали в заданной области комплексной плоскости, необходимо и достаточно, чтобы в этой области находились все корни 2^n полиномов вида (3), коэффициенты которых γ_i принимают граничные значения γ_i^- и γ_i^+ . Понятно, что для систем невысокого порядка объем вычислений, необходимых для проверки этого свойства, еще не выходит за разумные пределы. В то же время, неконструктивность этого подхода очевидна.

Поставим вопрос иначе: можно ли, зная множество возможных значений параметров объекта управления Δ , так задать корни «номинального» характеристического полинома $D_0(p) = D_{\text{ж}}(p)$, чтобы корни возмущенного полинома $D(p)$ оставались внутри некоторой области, содержащей назначенные полюсы, причем степень удаленности границ этой области от назначенных корней можно было бы в определенной мере регламентировать? Положительный ответ на этот вопрос в виде частного решения дан в работе [13]. Кратко приведем полученный там результат (поскольку на нем основано последующее обобщение этого подхода), снабдив его примером.

Прежде всего, отметим, что для удовлетворительного решения данной задачи необходимо выполнение так называемого условия согласованности

$$\mathbf{A} - \mathbf{A}_0 = \mathbf{B}\mathbf{f}^T, \quad (6)$$

где по-прежнему $\mathbf{A} = \mathbf{A}(\delta)$, $\mathbf{A}_0 = \mathbf{A}(\delta_0)$, матрица \mathbf{B} постоянна, а $\mathbf{f} = \mathbf{f}(\delta)$ – некоторый вектор. Условие (6) означает, что все столбцы матрицы $\mathbf{A} - \mathbf{A}_0$ имеют ту же структуру, что и матрица \mathbf{B} . Заметим, что это условие всегда будет выполнено, если выполняется условие Эрцбергера $\mathbf{A} - \mathbf{A}_0 = \mathbf{B}\mathbf{B}^+(\mathbf{A} - \mathbf{A}_0)$ (в этом случае $\mathbf{f}^T = \mathbf{B}^+(\mathbf{A} - \mathbf{A}_0)$), что, например, всегда имеет место для управляемого представления (4) (в матрице входа в общем случае нижний элемент отличен от единицы).

Решение, предложенное в [13], заключается в том, что для системы (1), (2), удовлетворяющей условию (6) и требованию управляемости пары $(\mathbf{A}_0, \mathbf{B})$, предлагается задавать характеристический полином в виде $D_0(p) = (p + 2r)^n$, где $r > r_0 > 0$, а параметр r_0

вычисляется указанным далее способом на основе данных об области Δ . В этом случае корни полинома $D(p)$ будут оставаться внутри круга радиуса r с центром в точке $-2r$ на вещественной оси (рис. 1). Заметим, что система будет обладать гарантированной степенью устойчивости r , а колебательность будет не выше 0.577.

Указанный результат основан на анализе невязки $q(p, \delta) = D(p, \delta) - D_0(p) = \det(p\mathbf{I} - \mathbf{A}(\delta) + \mathbf{BK}) - \det(p\mathbf{I} - \mathbf{A}_0 + \mathbf{BK})$, которая при выполнении условия (6) может быть представлена как $q(p, \delta) = \mathbf{f}^T(\delta) \text{adj}(p\mathbf{I} - \mathbf{A}_0)\mathbf{B}$. Согласно известной теореме Руше, если функции $D_0(p)$ и $q(p, \delta)$ аналитичны в односвязной ограниченной области S и на ее контуре C (см. рис. 1) и если $|D_0(p)| > |q(p, \delta)|$ на C , то $D_0(p) + q(p, \delta)$ и $D_0(p)$ имеют в S одинаковое число нулей. Поскольку все корни $D_0(p)$ лежат в S , то и корни $D(p)$ будут находиться в S .

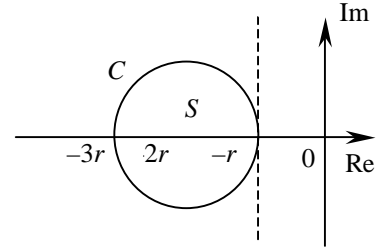


Рис. 1

Для произвольного комплексного числа p на окружности $C = C(-2r, r)$ имеем $|p + 2r| = r$ и $|D_0(p)| = |(p + 2r)^n| = r^n$, поэтому условие нахождения всех корней в S принимает вид

$$|q(p, \delta)| < r^n. \quad (7)$$

Из разложения невязки в ряд $q(p, \delta) = q_0(\delta) + q_1(\delta)p + \dots + q_{n-1}(\delta)p^{n-1}$ и очевидного соотношения $|p| \leq 3r$ для $p \in C$ следует оценка

$$|q(p, \delta)| \leq |q_0(\delta)| + |q_1(\delta)||p| + \dots + |q_{n-1}(\delta)||p|^{n-1} \leq n q_m \max[1, (3r)^{n-1}], \quad (8)$$

где $q_m = \sup\{|q_i(\delta)|, i = \overline{1, n-1}, \delta \in \Delta\}$. Условие (7) выполнится, если правая часть в (8) не превосходит r^n , что можно обеспечить при $3r > 1$ и $r > r_0 = \max[1/3, n q_m 3^{n-1}]$.

Приведенный результат, несмотря на свою привлекательность, не лишен недостатков. Во-первых, выбор биномиального полинома в качестве желаемого носит частный характер. Во-вторых, оценка вида (8) слишком груба и приводит к чрезмерно завышенным значениям r , что препятствует практической реализации модального регулятора. В качестве примера рассмотрим систему с объектом, заданным матрицами

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -a_3 & -a_2 & -a_1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b \end{bmatrix},$$

$a_1 \in [0.25 a_{10}, 2 a_{10}]$, $a_2 \in [0.25 a_{20}, 2 a_{20}]$, $a_3 \in [0.125 a_{30}, 2 a_{30}]$, $a_{10} = 1$, $a_{20} = 25.25$, $a_{30} = b = 12.5$. Разложение $q(p, \delta)$ в ряд дает $q(p, \delta) = -\tilde{a}_{30} - \tilde{a}_{20}p - \tilde{a}_{10}p^2$, где $\tilde{a}_i = a_i - a_{i0}$, $i = \overline{1, 3}$. Тогда $\max|q_0| = 12.5$; $\max|q_1| = 25.25$; $\max|q_2| = 1$, откуда $q_m = 25.25$

и $r_{\min} = 682$. В то же время, отказ от второго неравенства в (8) и простое усиление неравенства (7) с учетом условия $|p| \leq 3r$ приводит к неравенству $|q_0|_{\max} + |q_1|_{\max} 3r + |q_2|_{\max} (3r)^2 < r^3$, решение которого, $r > 14.34$, оказывается гораздо более точным.

Чтобы распространить рассмотренный результат на полиномы других типов, заметим, прежде всего, что окружность, служащая в [13] границей области разброса полюсов возмущенной системы, является геометрическим местом точек комплексной плоскости, где модуль полинома $D_0(p) = (p + 2r)^n$ постоянен. Поэтому для произвольного полинома $D_0(p)$ будем искать границу области расположения полюсов возмущенной системы как замкнутую линию, для всех точек которой выполняется условие

$$Q(x, y) = |D(p)|_{p=x+jy}^2 = Q_0 = \text{const} \quad (9)$$

(для удобства вместо модуля комплекснозначной функции берется квадрат модуля). Например, для полинома Баттерворта третьей степени $p^3 + 2\omega_0 p^2 + 2\omega_0^2 p + \omega_0^3 = (p + \omega_0)(p^2 + \omega_0 p + \omega_0^2)$, задаваемого с точностью до значения среднегеометрического корня ω_0 , получаем: $Q(x, y) = [(x + \omega_0)^2 + y^2][(x^2 + \omega_0 x + \omega_0^2 - y^2)^2 + y^2(2x + \omega_0)^2]$.

Обозначим корни $D_0(p)$ как p_{i0} , $i = \overline{1, n}$. Тогда $|p - p_{i0}|$ – расстояние от корня p_{i0} до точки $p = x + jy$ на контуре S . Поскольку $|D_0(p)|^2 = |p - p_{10}|^2 |p - p_{20}|^2 \dots |p - p_{n0}|^2$, то, согласно (9), $\sqrt{Q_0} = r^n$, где r – среднегеометрическое удаление корней полинома $D_0(p)$ от контура. Таким образом, уравнение (9) определяет этот контур как геометрическое место точек комплексной плоскости, для которых произведение расстояний до всех корней полинома $D_0(p)$ постоянно и равно $\sqrt{Q_0}$. При этом указанный контур представляет собой линию уровня функции $Q(x, y)$ со значением Q_0 . Такие линии уровня легко могут быть построены с помощью математических систем Matlab или Maple. Если значение Q_0 выбрать малым, то ему будет соответствовать не одна линия уровня, а n замкнутых линий, каждая из которых охватывает свой корень номинального полинома. Необходимо так задавать Q_0 , чтобы линия уровня была одна и область S , охватываемая ею, являлась, таким образом, односвязной. Следуя логике работы [13], удобно назначать Q_0 так, чтобы максимальная абсцисса соответствующей линии уровня равнялась половине максимальной абсциссы корней номинального полинома. Такая ситуация показана на рис. 2 для полинома третьей степени.

Чтобы вычислить значение Q_0 , достаточно подставить в приведенное выше выражение для $Q(x, y)$ значения координат точки A : $x_A = -\omega_0/4$, $y_A \approx \sqrt{3}\omega_0/2$ (последнее значение является хотя и приближенным, но вполне удовлетворительным); в общем случае полинома n -й степени рекомендуется принимать $x_A = -x_a/2$, $y_A \approx y_a$, где x_a и y_a –

координаты ближайшего к мнимой оси корня полинома $D_0(p)$, заданного с точностью до значения ω_0 . В нашем примере $Q(x_A, y_A) = 0.251\omega_0^6 = Q_0$. Последнее выражение, кстати, показывает, что координаты точки A и других характерных точек, а также значения $Q(x, y)$ и Q_0 можно нормировать, приняв во всех выражениях $\omega_0 = 1 \text{ с}^{-1}$; для определения же истинных значений достаточно нормированные координаты умножить на ω_0 , а нормированные значения $Q(x, y)$ и Q_0 – на ω_0^n .

Задав линию уровня значением Q_0 , мы должны оценить максимальное значение модуля комплексных чисел на этой линии. Без большой погрешности можно считать, что оно не превышает модуля абсциссы точки B на рис. 2: $|p| \leq |x_B|$. Но поскольку $y_B = 0$, то x_B находится как минимальное из двух вещественных решений уравнения $Q(x, 0) = Q_0$. В нашем примере имеем: $(x+1)^2(x^2+x+1)^2 = 0.251$, вещественные корни этого уравнения $x_1 = -1.343$, $x_2 = -0.351$; следовательно, $|x_B| = 1.343$. Таким образом, для всех точек рассматриваемого контура $|p| \leq 1.343\omega_0$.

Поскольку на контуре, заданном вышеуказанным способом с точностью до ω_0 , необходимо, согласно теореме Руше, выполнить неравенство $|q(p, \delta)| < |D_0(p)|$, потребуем, чтобы на этом контуре выполнялось неравенство

$$|q_0(\delta)| + |q_1(\delta)||p| + \dots + |q_{n-1}(\delta)||p|^{n-1} \leq \sqrt{Q_0}, \quad (10)$$

в котором в качестве усиления возьмем $|p| = |x_B|$ и $|q_i(\delta)| = |q_i(\delta)|_{\max}$, $i = 0, \dots, n-1$. Тогда, учитывая, что $\sqrt{Q_0} = |D_0(p)|$ и справедливо неравенство (8), указанное выше требование теоремы оказывается выполненным. В нашем случае условие (10) принимает вид $|q_0|_{\max} + |q_1|_{\max}|x_B| + |q_2|_{\max}|x_B|^2 \leq \sqrt{Q_0}$, или $12.5 + 25.25 \cdot 1.343\omega_0 + 1 \cdot (1.343\omega_0)^2 < \sqrt{0.251\omega_0^3}$, откуда минимальное положительное значение ω_0 , удовлетворяющее этому неравенству, равно 10.36.

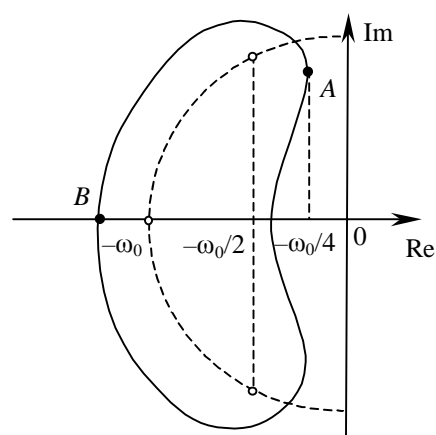


Рис. 2

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузовков Н. Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. М.: Машиностроение, 1976.
2. Второв В. Б., Благодарный Н. С. Синтез линейного закона управления для автоматических систем с нелинейностью при использовании критерия абсолютной устойчивости // Вопросы теории САУ: Вып. 8. Структуры сложных систем и алгоритмы управления. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1990. С. 125–140.
3. Второв В. Б. Синтез астатических систем с модальным управлением // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Сер. Автоматизация и управление. 2002. Вып. 1. С. 22–25.
4. Квакернаак Х., Сиван Р. Линейные оптимальные системы управления. М.: Мир, 1977.
5. Справочник по теории автоматического управления / Под. ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987.
6. Филлипс Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001.

7. Kudva P., Gourishankar V. Adaptive scheme for pole assignment in linear systems // Proc. Instr. Elec. Eng. 1976. V. 123, № 3. P. 267–270.
8. Bhattacharyya S. P., De Souza E. Pole assignment via Sylvester's equation // Systems and Control Letters. 1992. Vol. 1. P. 261–263.
9. Kautsky J., Nichols N. K. Robust pole assignment in linear state feedback // Int. J. Control. 1985. № 41. P. 1129–1155.
10. Борцов Ю. А., Поляхов Н. Д., Путов В. В. Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением. Л.: Энергоатомиздат, 1984.
11. Управление динамическими системами в условиях неопределенности / С. Т. Кусимов, Б. Г. Ильясов, В. И. Васильев и др. М.: Наука, 1998.
12. Varga A. Robust pole adjustment techniques via state feedback //www.robotic.dlr.de/control/publications/2000/varga/_cdc2000pl.pdf.
13. Olbrot A. W. Arbitrary robust eigenvalue placement by a static state feedback // IEEE Transactions on Automatic Control. 1996. Vol.41, № 8. P. 1214–1215.

V. B. Vtorov, Xiao Chenglin

ON THE PROBLEM OF DYNAMIC SYSTEM POLE ROBUST ASSIGNMENT

For linear single input time-invariant state feedback system a problem is considered to assign the system poles in such way that bounded parametric perturbations do not result in leaving a certain region. The well-known solution of the problem implying the binomial characteristic polynomial assignment is extended to polynomials of any type, in particular Butterworth polynomials.

УДК 681.51 (075.8)

А. Г. Клименков, С. Н. Турусов, Т. С. Чернышева

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ В ЗАДАЧАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОНСТРУКТИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СУДОВ НА ПОДВОДНЫХ КРЫЛЬЯХ

Рассматриваются структура и методы построения обобщенных математических моделей судов на подводных крыльях для использования в программно-алгоритмическом комплексе для обеспечения конструктивной безопасности этих судов.

Конструктивная безопасность, судно на подводных крыльях, высокоскоростные суда

Суда на подводных крыльях (СПК) являются удобным высокоскоростным транспортным средством. Но их проектирование и оценка их безопасности зачастую связаны с определенными трудностями. В настоящее время отсутствуют единый системный методологический подход и комплексная технология обеспечения безопасности новых высокоскоростных морских и речных транспортных средств и их основных технических систем на протяжении всего жизненного цикла, включающего различные этапы их создания и эксплуатации. Эффективное решение этой проблемы возможно только на основе системных методологических принципов по единой современной технологии, используемой всеми организациями, участвующими в создании и эксплуатации судов. Поэтому разработка таких методологических принципов, технологии и соответствующего законченного программного продукта актуальна и будет содействовать повышению эффективности функционирования транспортных систем в целом.

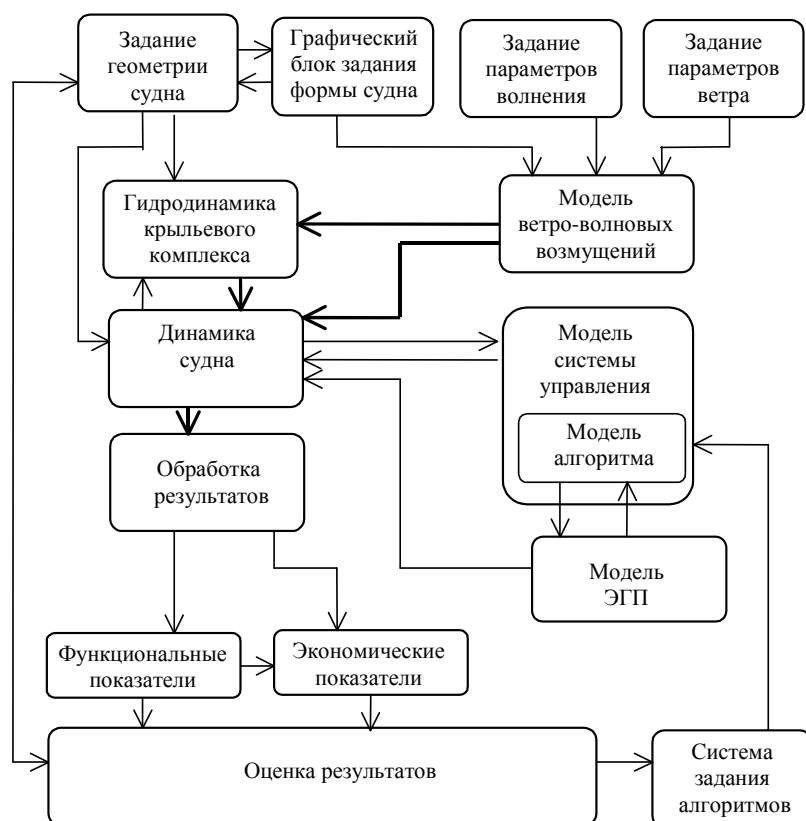
На рисунке приведена примерная графическая структура обобщенной математической модели для решения комплекса задач системного обеспечения конструктивной безопасности СПК с произвольной крыльевой схемой.

Узловыми элементами обобщенной математической модели являются частные математические модели расчета внешних гидродинамических сил и моментов на элементах крыльевого комплекса, а также модели расчета динамики судна, ветро-волновых возмущений, электрогидравлического привода, системы управления движением. Кроме того, в среде моделирования важную роль играют блоки обработки и оценки результатов моделирования. После обработки результатов моделирования проектантом формируются функциональные и экономические показатели, по которым производится оценка полученных результатов. На основании этих результатов, если требуется, производится коррекция геометрии судна, параметров его технических систем, алгоритмов управления и других конструктивных факторов, влияющих на безопасность судна. В систему моделирования включены также вспомогательные блоки ввода информации. Блок задания геометрии отвечает за ввод геометрических и инерционных характеристик судна, его крыльевого комплекса и его технических систем. С этим блоком связан вспомогательный графический блок, с помощью которого можно осуществлять визуальное изменение формы элементов крыльевой схемы и архитектуры корпуса для расчета его парусности. Для ввода параметров волнения и ветра также предусмотрены соответствующие вспомогательные блоки.

Важным элементом системы является блок задания алгоритмов управления. Интерфейс этого блока должен предусматривать как удобный способ задания коэффициентов стандартных линейных алгоритмов, так и механизм быстрого оперативного задания нелинейных алгоритмов нестандартной структуры.

Внешние динамические силы и моменты, возникающие на элементах несущего комплекса СПК, можно разделить на две группы:

- аэродинамические;
- гидродинамические.



При моделировании динамики СПК аэродинамические силы обычно не учитываются, поскольку предполагаются малыми по сравнению с гидродинамическими силами. При анализе управляемости и устойчивости судна на заданном курсе может быть учтен аэродинамический момент, зависящий от архитектуры корпуса и надстроек. Причем для определения примерной формы корпуса в разных измерениях необходимо создать специальный графический инструмент, который позволил бы быстро и просто задавать примерные контуры формы корпуса для дальнейшего определения его парусности. Влияние относительно постоянного ветрового возмущения удобнее задавать в блоке задания параметров модели динамики как постоянный дополнительный момент, приложенный к судну. В отличие от постоянного ветрового возмущения влияние порыва ветра на динамику судна требует дополнительного расчета, поэтому его целесообразно вынести в отдельный блок.

Основную часть внешних динамических сил, возникающих при движении СПК в крыльевом режиме, составляют гидродинамические силы и моменты, возникающие на элементах крыльевых устройств судна. Для их аналитического определения используется алгоритм, предложенный А. Н. Лордкипанидзе [1].

Для адекватного описания движения судна, произвольно маневрирующего в пространстве в условиях действия внешних возмущений, будем использовать нелинейную модель динамики движения относительно произвольной прямоугольной системы координат. Дифференциальные уравнения движения СПК можно получить на основе уравнений Эйлера:

$$\begin{aligned}\frac{d\vec{B}}{dt} + [\vec{W} \times \vec{B}] &= \vec{F}, \\ \frac{d\vec{N}}{dt} + [\vec{W} \times \vec{N}] + [\vec{V} \times \vec{B}] &= \vec{M},\end{aligned}$$

где \vec{B} – главный вектор количества движения тела; \vec{N} – главный момент количества движения; \vec{F} – главный вектор внешних сил; \vec{M} – главный момент внешних сил; \vec{V} – вектор скорости поступательного движения центра тяжести судна; \vec{W} – вектор угловой скорости вращательного движения относительно центра тяжести.

В дальнейшем, проектируя векторные уравнения на оси произвольной прямоугольной системы координат и полагая, что масса является постоянной или медленно меняющейся функцией времени, можно получить систему скалярных уравнений. При этом, как и для большинства подвижных объектов, можно принять ряд допущений, упрощающих левые части полученной системы уравнений.

Особенность описания динамики СПК заключается в том, что крайне сложно получить гидродинамические характеристики всего несущего комплекса в целом. Это приводит к тому, что при составлении математической модели необходимо рассматривать одновременно действия большого числа гидродинамических сил, сосредоточенных в различных точках комплекса. Каждая элементарная гидродинамическая сила является, как правило, нелинейной функцией фазовых координат объекта и углов сноса потока (α и β).

В соответствии с принятой методикой расчета внешних сил и моментов гидродинамические характеристики несущих элементов СПК представляются в виде функций нескольких аргументов. В качестве таких аргументов используются заглубление крыльевого устройства h и местные углы сноса потока: угол атаки α и угол дрейфа β . При движении на волнении к ним добавляются соответствующие волновые составляющие h_{Vi} , α_{Vi} , β_{Vi}

Углы дрейфа целесообразно вычислять только при решении уравнений бокового движения, в противном случае они полагаются равными нулю. При отсутствии волновых возмущений величины h_{Bi} , α_{Bi} , β_{Bi} можно автоматически считать равными нулю.

При моделировании пространственного движения судна на каждом этапе осуществляется пересчет нового положения судна и состояния его систем в зависимости от состояния других систем и алгоритмов. При этом суммируются все силы и моменты, действующие на судно и полученные из других блоков алгоритма. Необходимо предусмотреть приведение всех сил и моментов в единую систему координат, поскольку в других блоках часто используются другие системы координат, не совпадающие с основной. Целесообразно сформировать матрицы перехода между основными системами координат, используемыми в различных блоках. Это сильно упростит саму процедуру пересчета, позволит избежать лишних ошибок и значительно сократить время перехода между отдельными блоками модели.

Алгоритм расчета внешних гидродинамических сил и моментов предполагает их определение для ряда дискретных значений аргументов. Указанные зависимости хранятся в соответствующих базах данных по гидродинамике крыльевых устройств. Для вычисления текущих значений гидродинамических сил и моментов на элементах крыльевых устройств используется линейная интерполяция.

Взаимодействие несущего комплекса СПК со взволнованной поверхностью моря отличается рядом особенностей:

- высота волны при расчетном волнении сравнима с вертикальными размерами стоек и крыльев; при этом заглубления изменяются фактически от нуля до максимального значения, что не позволяет проводить линеаризацию гидродинамических характеристик;
- расстояния между отдельными элементами крылевого комплекса сравнимы с длиной волны, в результате чего фазы и величины волновых возмущений заметно различаются на разнесенных друг от друга несущих элементах;
- между значением ординаты волны и волновым приращением угла атаки имеется определенный фазовый сдвиг, который при изменении курсового угла встречи с волной на 180° изменяется от $+\frac{\pi}{2}$ до $-\frac{\pi}{2}$, что приводит к существенным отличиям в динамике движения.

Известны два способа математического описания моделирования процесса волнового возмущения – спектральный и гармонический.

Первый способ позволяет изучать статистические характеристики фазовых координат линеаризованного объекта по заданной спектральной плотности входных возмущений. Второй способ предполагает моделирование нерегулярного волнения суммой элементарных гармонических волн. Как частный случай может рассматриваться регулярное волнение, моделируемое одной гармоникой.

Положительной стороной применения спектрального способа описания является учет реальной (случайной) природы волнения, а также использование хорошо разработанных методов анализа линейных систем. Но при этом существует определенное требование к линеаризации дифференциальных уравнений объекта.

Из-за наличия существенной нелинейной зависимости гидродинамических сил от величины заглубления (особенно для СПК с V-образными крыльями) линеаризация уравнений объекта при волнении представляется недопустимой.

Даже в случае стабилизации рассматриваемого объекта, когда можно говорить о малых приращениях фазовых координат (высоты, дифферента, крена), приращения заглоблений остаются соизмеримыми с амплитудой волнения и, при строгой постановке задачи, линеаризованные относительно фазовых координат уравнения движения должны иметь переменные (периодически меняющиеся с периодом волнения) коэффициенты. При этом теряются все преимущества такой модели в качестве аппарата для исследования динамики управляемого движения.

Кроме того, существует сложность определения спектра возмущения, заключающаяся в необходимости перехода от исходного спектра морского волнения к спектру возмущений, действующему на подвижный объект. Трудности, возникающие при этом, фактически ограничивают диапазон исследования прямолинейным движением с постоянной скоростью. И даже в этом случае для некоторых углов встречи с волной имеет место проблема, связанная с неоднозначностью перехода от спектра в неподвижной системе координат к спектру в подвижной системе координат.

С точки зрения исследования технических систем СПК, например системы управления движением, применение спектрального способа затрудняет исследование возможных нелинейных алгоритмических структур, а также не позволяет использовать в алгоритме управления параметры, не являющиеся непосредственно фазовыми координатами объекта, такие, например, как текущее заглобление стойки или крыла.

Указанные недостатки ограничивают область применения спектрального способа и не позволяют использовать его при разработке программы моделирования динамики СПК, маневрирующего во всем диапазоне скоростей и курсовых углов.

Способ математического моделирования с использованием регулярного волнения (он сводится к замене реального волнения элементарной гармонической волной) тоже имеет свои недостатки. Самый главный из них – это потеря статистических особенностей реального морского волнения. Но этот способ позволяет учесть следующие важные физические особенности взаимодействия взволнованной морской поверхности с крыльевой схемой СПК:

- фазовое соотношение между приращением заглобления и волновым приращением угла атаки;
- сдвиг по фазе между приходом ординаты волны к различным точкам крыльевой схемы.

При этом гармонический способ описания волнения лишен основного недостатка спектрального способа – он не требует линеаризации объекта и при определенной обработке известных формул позволяет вычислить параметры волновых возмущений для произвольно маневрирующего по курсу СПК.

В ряде работ предлагается совместить преимущества регулярной модели со свойствами реального случайного волнения путем представления взволнованной поверхности как суперпозиции конечного числа элементарных гармонических волн, распространяющихся под различными углами друг к другу и с произвольной начальной фазой.

Полигармоническое описание волнения обладает и определенной вычислительной универсальностью, позволяющей без изменения структуры вычислений, за счет лишь количественных изменений, переходить от простых моделей волнения к сложным, включая трехмерные.

Ветровые возмущения, действующие на судно, учитываются в виде момента, приложенного к корпусу судна. Они зависят от направления распространения ветра, его силы

и примерной формы надводной части корпуса судна (парусности). При этом, как уже говорилось, целесообразно учитывать только порыв ветра, поскольку постоянные ветровые воздействия не требуют дополнительного расчета и могут быть введены в математическую модель добавлением дополнительного постоянного момента на корпусе.

Расчет прочности крыльевых устройств и корпуса СПК в целом – один из самых важных этапов проектирования судна. Методы расчета прочности СПК отличаются от обычных методов расчета, применяемых при проектировании водоизмещающих судов, главным образом в связи с тем, что вследствие значительного повышения скоростей судов основные элементы корпуса и крыльевого комплекса несут ударно-переменные и статически переменные нагрузки. При движении СПК в условиях волнения могут возникать значительные нестационарные гидродинамические силы, воздействующие на корпус и крылья. Причем гидродинамические силы, действующие на крыло, вычисляются по исходной геометрии самого крыла. Поэтому разработка конструкции крыльевого комплекса должна быть тесно связана с расчетом его прочностных характеристик.

По требованиям Морского Регистра расчеты прочности должны включать в себя: расчет общей прочности, расчет местной прочности, расчет прочности крыльевых устройств, расчет вибрации и данные по сроку службы судна.

При моделировании электрогидравлического привода (ЭГП) целесообразно одновременно с динамикой привода учитывать ограничение, накладываемое на сигнал управления, чтобы не допустить ударов закрылка о механические упоры. Сигналы управления, приходящие на вход элемента ограничения, вычисляются в соответствии с заданным алгоритмом управления. Выходным параметром модели является угол перекладки закрылка (или руля). ЭГП можно рассматривать как следящую систему, состоящую из суммирующего устройства, электрогидроусилителя и силового интегрирующего привода, охваченных общей обратной связью по положению и по скорости.

Немаловажную роль играет проектирование системы управления движением СПК. Система управления должна удовлетворять ряду требований, предусмотренных Морским Регистром. При проектировании системы управления наиболее сложной и трудоемкой задачей является формирование адекватных алгоритмов управления. Полная проверка работоспособности таких алгоритмов может быть проведена только опытным путем. Кроме того, они тесно связаны с общей динамикой судна, конструкцией главной энергетической установки, геометрией и динамикой крыльевого комплекса. Хороший алгоритм управления должен обеспечивать устойчивость движения судна, минимизировать качку и вертикальные перегрузки. Без моделирования практически невозможно проанализировать работу алгоритма на всех режимах движения судна при всех внешних воздействиях. Сложной задачей является создание унифицированного метода записи алгоритмов управления, пригодного для включения его в общий программный комплекс моделирования движения СПК.

Под алгоритмом управления обычно понимается набор аналитических или логических уравнений, определяющих законы отклонения каждого исполнительного органа. Таким образом, полный алгоритм управления должен давать правило для определения вектора управляющих воздействий, размерность которого, в общем случае, равна числу используемых органов управления. Так как наиболее устойчивым звеном систем автома-

тического управления является электрогидравлический привод, его динамика с характерными нелинейностями была вынесена в отдельный блок моделирования.

Анализ известных систем автоматического управления движением СПК, а также возможных перспектив их развития, показывает, что наиболее распространенной формой используемых в эксплуатируемых системах управления движением СПК алгоритмов управления являются линейные алгоритмы. Поэтому при разработке блока задания алгоритмов управления было признано целесообразным принять линейную математическую модель в качестве базовой с возможностью введения в нее дополнительных составляющих.

Описанная структура является основой для разработки алгоритмического и программного обеспечения комплексной компьютерной технологии оценки конструктивной безопасности СПК на этапе проектирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Программа поверочного расчета подводного крыла произвольной геометрии. Морской Регистр России, НПП «Форма». СПб. 1993.
2. Кользаев Б. А., Косоруков А. И., Литвиненко В. А. Справ. по проектированию судов с динамическими принципами поддержания. Л.: Судостроение, 1980.

A. G. Klimenkov, S. N. Turusov, T. S. Chernisheva

METHODS OF CONSTRUCTION OF MATHEMATICAL MODEL IN PROBLEMS OF SECURITY OF SYSTEM SAFETY OF HYDROFOIL SHIPS

Structure and method of generalized mathematical model for determination of problem complex of system safety of hydrofoil ships are considered.

УДК 62.50

*Н. Д. Поляхов, И. А. Приходько, Д. Н. Поляхов,
Е. С. Анушина, Е. Ю. Шеина*

МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАГРУЗКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ НЕЙРОНЕЧЕТКОГО ПОДХОДА¹

В работе разработана и исследована модель прогнозирования электрической нагрузки, позволяющая повысить точность краткосрочного прогноза. Выполнено сравнительное исследование эффективности нейронечетких и регрессивных моделей прогнозирования. Оцениваются допустимость применения небольшой обучающей выборки и возможность получения правильных результатов при наличии противоречивой исходной информации.

Прогнозирование электрической нагрузки, нейронечеткие модели

Своевременное получение информации о предстоящей нагрузке необходимо для оптимального распределения мощности электростанций, размещения резервной мощности, оценки надежности [1], [2]. Краткосрочное прогнозирование электрической нагрузки применяется в задачах внутрисуточного планирования и управления выработкой электроэнергии на электростанциях. Ошибка прогнозирования (как недооценка, так и завышение) снижает качество управления и экономичность режимов энергосистемы. Недооценка нагрузки приводит к необ-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Минобразования РФ № 01 2003 03990.

ходимости использования дорогостоящих аварийных электростанций. Завышенное предсказание увеличивает издержки на поддержание в рабочем состоянии излишних резервных мощностей. Поскольку к настоящему времени изношенность оборудования электростанций составила 30–70 % [1], возросла значимость требований к точности прогноза для упреждающей оценки живучести энергосистем. Кроме того, краткосрочный прогноз является наиболее важным для работы энергопроизводящих компаний. По результатам осуществляется планирование контрактов по обмену электроэнергией с другими компаниями (покупке или продаже).

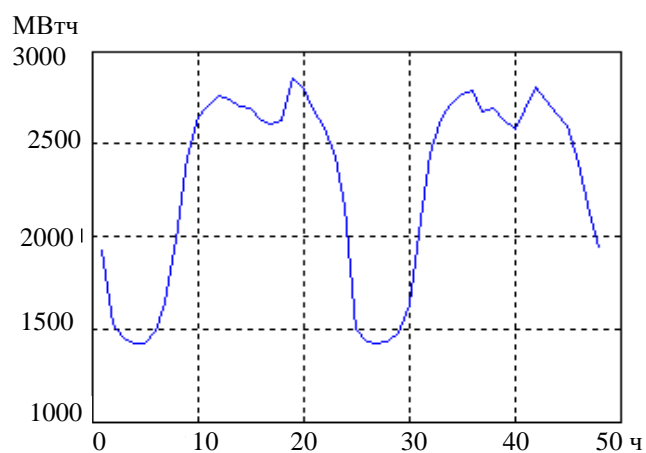


Рис. 1

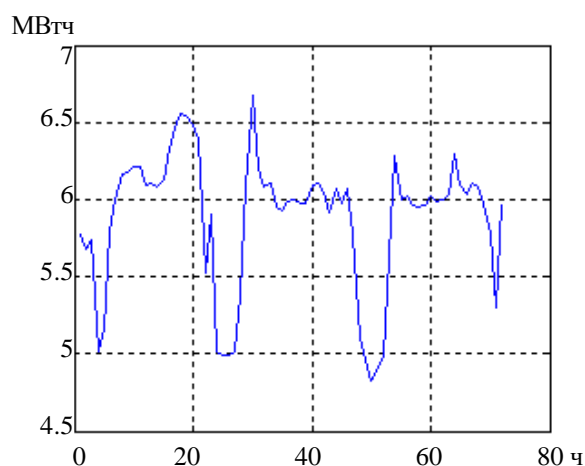


Рис. 2

Цель исследования: увеличение точности предсказания предполагаемого потребления электроэнергии с целью повышения надежности электроснабжения.

Изменение электрической нагрузки в энергосистеме представляет собой случайный процесс, зависящий от многих факторов. Традиционно задача прогнозирования электрической нагрузки решается с использованием графиков нагрузки и эмпирических формул [2] или на основе методов статистического анализа [3]. Для применения статистических моделей требуется большой набор экспериментальных данных (достаточных для определения характера распределения) и возможность приведения нестационарного процесса (каким является режим электропотребления) к стационарному. Нестационарность процессов электропотребления характеризуют графики данных обучающей выборки, представленные на рис. 1, 2. В первом случае обучающая выборка включала часовые значения электрической нагрузки 4-х рабочих дней ноября, полученные с использованием справочных данных [1] и данных, приведенных в публикациях [2] (на графике приведены данные 2-х дней). Максимальный разброс параметров – 12.6 % (выборка I). Во втором – используются реальные данные 3-х рабочих дней февраля 2004 года¹. Максимальный разброс данных обучающей выборки – 16 % (выборка II). Обучающая выборка включает три возможных варианта распределения нагрузки по часам. Пика нагрузки можно ожидать как в первой, так и во второй половине дня. Изменение нагрузки во времени представляет собой слабо коррелированный (нестационарный) случайный процесс, что может привести к снижению точности прогноза при использовании традиционных методов [1], [2]. Альтернативным подходом является применение искусственных ней-

Logic Toolbox, построение линейной (по параметрам) регрессионной модели – с использованием Statistics Toolbox.

С помощью Statistics Toolbox (функция `gstool`) оценивалась эффективность регрессионных моделей, содержащих:

- константу, линейные члены (*linear*);
- константу, линейные члены и парные взаимодействия факторов (*interaction*);
- парные взаимодействия и квадратичные члены (*pure quadratic*);
- константу, линейные члены и парные взаимодействия и квадратичные члены (*full quadratic*).

Оценивалась точность нечеткой модели прогнозирования при наличии 2, 3 и 4-х входов (значения активной мощности за прошедшие 2–4 часа).

Выполнен анализ допустимого разброса проверочных данных:

- для выборки I использованы проверочные данные, не выходящие за пределы обучающей выборки;
- для выборки II – разброс проверочных данных превышает разброс данных обучающей выборки и составляет 20.5 %.

Лучшей из регрессионных оказалась модель *full quadratic*. Для выборки I средняя погрешность составила 3.3 %, максимальная – 10.2 %. Для выборки II средняя погрешность равна 2.6 %, максимальная – 9 %.

При обучении нейронечеткой сети оценивалась точность гибридного алгоритма обучения на основе методов обратного распространения ошибки и наименьших квадратов (функции `anfis`, `genfis1`) и алгоритма на основе метода кластеризации данных (функция `genfis2`). В первом случае можно задавать число и тип функций принадлежности, количество циклов обучения, вид алгоритма нечеткого вывода (1 и 0-го порядков). Во втором случае можно влиять на точность обучения, варьируя область влияния кластеров.

Лучшие результаты получены при использовании метода кластеризации. Если разброс проверочных данных не выше, чем у обучающей выборки, можно добиться нулевой ошибки обучения, уменьшая область влияния кластеров. Количество нечетких правил модели при этом возрастает.

В противном случае лучшие результаты можно получить, увеличивая область влияния кластеров. Количество нечетких правил модели при этом будет уменьшаться. В первом случае радиус кластеризации выбран равным 0.05, число нечетких правил равно 96. Точность прогноза мало зависит от числа предыдущих значений нагрузки и от времени упреждения. Максимальная ошибка составляет 2.5 %, средняя ошибка – 0.5 %. На рис. 3 приведены графики нагрузки, полученные в результате двух способов прогнозирования: на основе нейронечеткой модели и на основе регрессионной модели.

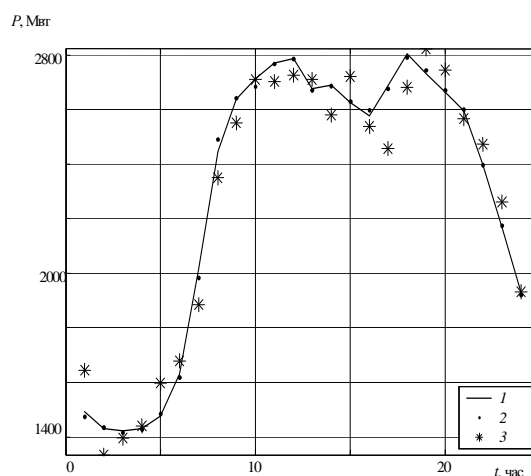
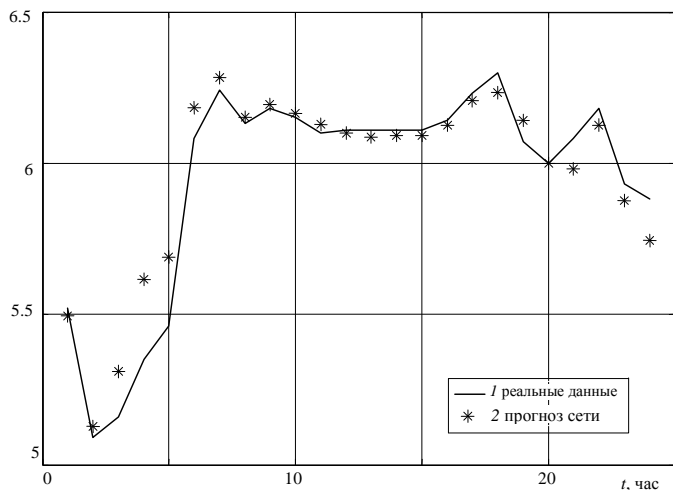


Рис. 3

Час	4 входа 1 выход			3 входа 1 выход		2 входа 1 выход	
	Фактич.	Прогноз	Ошибка прогноза, %	Прогноз	Ошибка прогноза, %	Прогноз	Ошибка прогноза, %
0	55.2	54.4	1.3868	54.938	0.5771	55.155	0.24919
1	50.9	51.736	-1.4801	51.283	-0.705	52.11	-2.3093
2	51.6	53.187	-2.9487	53.089	-2.8873	53.755	-4.2038
3	53.5	55.456	-3.5922	56.143	-4.9561	55.309	-3.3767
4	54.6	57.191	-4.7926	56.888	-4.1804	55.858	-2.2472
5	60.8	62.212	-2.2704	61.823	-1.608	61.213	-0.58137
6	62.4	61.883	1.0055	62.841	-0.58294	62.017	0.59369
7	61.3	60.589	1.3168	61.505	-0.36833	61.246	0.048515
8	61.8	61.741	0.12768	61.942	-0.26257	61.588	0.32609
9	61.5	61.731	-0.5047	61.634	-0.2364	61.374	0.18137
10	61	61.622	-0.98021	61.27	-0.41699	60.892	0.16451
11	61.1	61.096	-0.0177	60.998	0.15819	60.919	0.28133
12	61.1	61.506	-0.63189	60.86	0.35183	60.934	0.25783
13	61.1	61.493	-0.56658	60.899	0.29698	60.934	0.25783
14	61.1	61.506	-0.59257	60.899	0.29698	60.934	0.25783
15	61.4	61.693	-0.42184	61.25	0.23174	61.233	0.26379
16	62.3	62.477	-0.28694	62.056	0.33884	61.932	0.55374
17	63	63.521	-0.90804	62.321	0.96167	62.235	1.1428
18	60.7	62.755	-3.4093	61.412	-1.2442	60.809	-0.21719
19	60	59.377	1.0079	59.992	-0.0113	59.566	0.6554
20	60.8	59.704	1.6873	59.813	1.525	60.446	0.54559
21	61.8	61.72	0.15049	61.251	0.82716	61.567	0.37124
22	59.3	59.375	-0.36141	58.754	0.74147	58.846	0.66142
23	58.8	58.031	1.3006	57.421	2.3686	58.36	0.82503

P , МВт



Прогнозирование осуществлялось с упреждением в 3 часа. Кривая 1 на рис. 3 отображает фактические данные нагрузки в прогнозируемый период. Кривая 2 представляет прогноз на основе нейронечеткой модели, который практически не отличается от реальных значений нагрузки. Кривая 3, соответствующая результатам прогнозирования, полученным с использованием регрессионной модели, имеет существенные отклонения от

фактических данных. При значительном разбросе проверочных данных (20.5 %) радиус кластеризации выбран равным 0.2, число нечетких правил уменьшилось до 3.

Лучшие результаты прогнозирования получены для модели с двумя входами. Средняя ошибка прогнозирования составила: 1.32 % для системы с 4 входами, 1.08 % для системы с 3 входами, 0.86% для системы с 2 входами.

Результаты прогнозирования, полученные с использованием нейронечеткой модели, приведены в таблице и на рис. 4.

Использование нейронечетких моделей для прогнозирования нагрузки энергосистем вместо регрессионных позволяет повысить точность предсказания в 6.6 раза, если разброс проверочных данных не превышает разброса обучающей выборки, и в 2 раза в случае превышения. Средняя ошибка прогноза равна 0.5 % в первом случае и 1 % – во втором.

Точность обучения нейронечеткой сети выше в случае применения метода кластеризации (функция *genfis2*).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков Э. П., Баринов В. А., Маневич А. С. Проблемы и перспективы развития электроэнергетики в России. М.: Энергоатомиздат, 2001.
2. Электротехнический справочник: Кн. 1. Производство и распределение электрической энергии / Под общ. ред. Проф. МЭИ: И. Н. Орлова (гл. ред.) и др. М.: Энергоатомиздат, 1988. 880 с.
3. Бэнн Д. В., Фармер Е. Д. Сравнительные модели прогнозирования электрической нагрузки: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1987. 200 с.
4. Минаев Ю. Н., Филимонова О. Ю., Бенамеур Л. Методы и алгоритмы решения задач идентификации и прогнозирования в условиях неопределенности в нейросетевом логическом базисе. М.: Горячая линия – Телеком, 2003. 205 с.
5. Шумилова Г. П., Готман Н. Э., Старцева Т. Б. Прогнозирование нагрузок ЭЭС на базе новых информационных технологий // Новые информационные технологии в задачах оперативного управления электроэнергетическими системами. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. С. 127–156.
6. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control//IEEE Trans. on syst., Man, and Cybernetics. 1985. Vol. 15, № 1, January/February. P.116–132.
7. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д. А. Поспелова. М.: Наука, 1986. 312 с.
8. Дьяконов В., Абраменкова И. Математические пакеты расширения MATLAB. С.Пб.: Питер, 2002. 604 с.

N. D. Polyakhov, I. A. Prikhodko, D. N. Polyakhov, E. C. Anushina, E. Y. Sheina

THE MODEL OF FORECASTING OF POWER SYSTEM LOADING BASED ON THE NEURO-FUZZY APPROACH

The model of forecasting of the electric loading is developed and investigated that allows to increase accuracy of the short-term forecast. Comparative research of efficiency of the neuro-fuzzy approach and the statistical analysis method is executed. The admissibility of application of small training sample, and opportunity of reception of correct results are evaluated at the presence of the inconsistent initial information.

ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Предлагается метод оценки безопасности транспортных комплексов, основанный на расчете показателей риска. Разработана модель оценки территориального и социального рисков при возникновении аварий, связанных с перевозками опасных грузов на автомобильном и железнодорожном транспорте.

Риск, оценка риска, моделирование, оценка последствий аварий

Под *опасными веществами* понимаются воспламеняющиеся, окисляющие, горючие, взрывчатые, токсичные, высокотоксичные вещества, а также вещества, представляющие опасность для окружающей среды [1]. Нормативные документы [2] определяют *риск аварии* как меру опасности, характеризующую возможность возникновения аварии на опасном объекте и тяжесть ее последствий. *Оценка риска аварии* – процесс, используемый для определения вероятности возникновения аварий и тяжести их последствий для человека, имущества и/или окружающей среды. Оценка риска формируется на основе анализа вероятности аварии и анализа ее последствий.

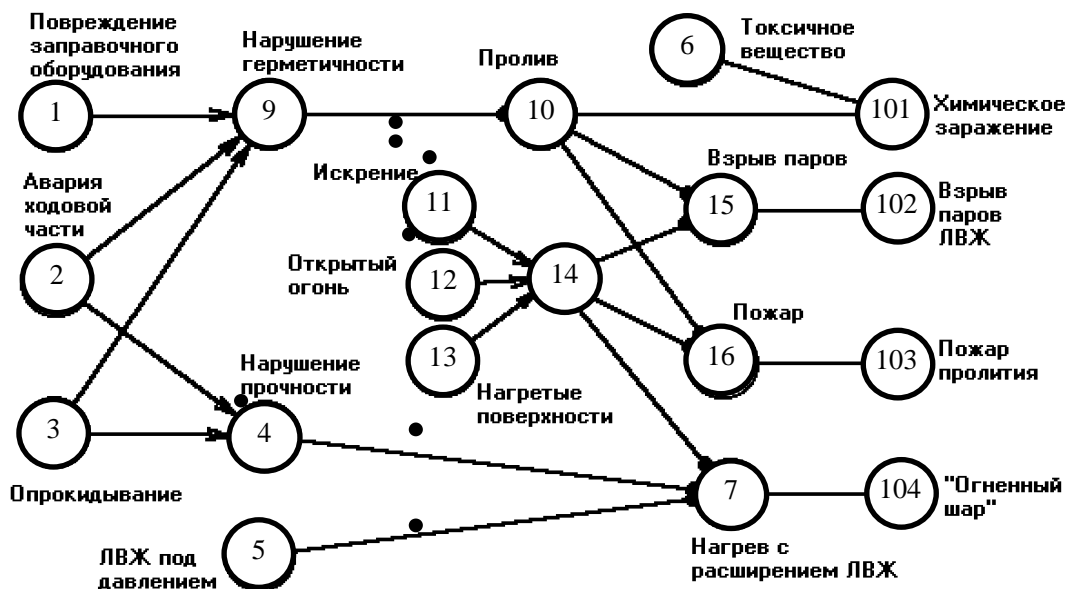


Рис. 1. Модель формирования опасных факторов при авариях транспортных средств, перевозящих опасные вещества

Как показывает статистика, в качестве причин аварии транспортных средств могут выступать отказ или разрушение собственного оборудования (емкости, насосы, краны и т. п.) или внешние воздействия (удары, взрывы, пожары, природные воздействия и т. д.). В большинстве случаев развитие первичной аварии (например, нарушение герметичности цистерны) непосредственно не ведет к опасным последствиям – заражению территорий, разрушению зданий и оборудования, поражению населения. Проявление поражающих факторов (химическое заражение, ударная волна или термическое поражение) возникает в

большинстве случаев только при наличии сопутствующих факторов, в качестве которых могут выступать источники возгорания при взрывах и пожарах, достаточная для формирования ядовитого облака температура окружающей среды, сила ветра и состояние атмосферы при химической аварии.

Моделирование аварий, возникающих при перевозках опасных грузов. На рис. 1 приведена модель развития аварии транспортного средства, перевозящего опасные грузы: химически опасные, пожароопасные или взрывоопасные. Анализ большого числа аварий на автомобильном (железнодорожном) транспорте позволяет утверждать, что в качестве первичных факторов аварии выступают:

- повреждение заправочного оборудования (вершина 1), вызванное неисправностями запорных устройств или трубопроводов для приема груза;
- авария ходовой части (вершина 2), вызванная собственными неисправностями транспортного средства или столкновением его с другим транспортным средством;
- опрокидывание транспортного средства (вершина 3) в результате неправильных маневров или столкновения с другими транспортными средствами.

Для описания сценария развития использован аппарат схем функциональной целостности, основанный на общем логико-вероятностном методе [3]. Процесс развития аварии (см. рис. 1) представляется как последовательность событий, каждое из которых возникает при выполнении определенных условий (дуги «И» обозначены точками, дуги «ИЛИ» – стрелками). Каждое событие происходит с определенной вероятностью.

Система уравнений, описывающих модель формирования опасных факторов при авариях транспортных средств (см. рис. 1), включает 19 логических уравнений:

$$\begin{array}{lll}
 y_1 = x_1 & y_9 = x_9 \cdot (y_1 + y_2 + y_3) & y_{16} = x_{16} \cdot y_{14} \cdot y_{10} \\
 y_2 = x_2 & y_{10} = x^{10} \cdot y_9 & y_{101} = y_{10} \cdot y_6 \\
 y_3 = x_3 & y_{11} = x_{11} & y_{102} = y_{15} \\
 y_4 = x_4 \cdot (y_2 + y_3) & y_{12} = x_{12} & y_{103} = y_{16} \\
 y_5 = x_5 & y_{13} = x_{13} & y_{104} = y_7 \\
 y_6 = x_6 & y_{14} = y_{11} + y_{12} + y_{13} & \\
 y_7 = x_7 \cdot y_{14} \cdot y_4 \cdot y_5 & y_{15} = x_{15} \cdot y_{10} \cdot y_{14} &
 \end{array}$$

Здесь y_i – выходная функция работоспособности элемента i ; x_i – значение работоспособности элемента i ; i – номер вершины в сети на рис. 1; «·» – логическое И; «+» – логическое ИЛИ.

В табл. 1 приведено описание элементов модели и указаны принятые при моделировании значения вероятностей возникновения событий.

Таблица 1

Исходные данные для моделирования

Номер элемента	Параметр (описание вершины)	Значение вероятности
<i>Вероятности возникновения аварийных факторов (в течение 1 года)</i>		
1	Разрушение заправочного оборудования	0.0839
2	Авария ходовой части с повреждением цистерны	0.0839
3	Опрокидывание с повреждением цистерны	0.0009
<i>Вероятности разрушения цистерны при аварии транспортного средства</i>		
4	Нарушение прочности цистерны при аварии	0.25

Номер элемента	Параметр (описание вершины)	Значение вероятности
9	Нарушение герметичности цистерны при аварии	0.25
<i>Вероятности присутствия опасных факторов</i>		
5	Опасное вещество находится под давлением	0.15
6	Вещество является токсичным	0.10
<i>Вероятности появления факторов, вызывающих горение при аварии</i>		
11	Искрение	0.10
12	Открытый огонь	0.05
13	Наличие поверхностей, нагретых до температуры самовоспламенения опасного вещества	0.25
<i>Вероятности проявления сценария аварии</i>		
7	Нагрев цистерны с ЛВЖ под давлением	0.60
10	Пролив опасного вещества	0.90
15	Взрыв паров опасного вещества	0.80
16	Пожар пролития	0.80

В качестве критериев опасности рассматривались вероятности возникновения химического заражения (вершина 101 на рис. 1), взрыва паров легковоспламеняющейся жидкости (вершина 102), пожара пролива опасного вещества (вершина 103), возникновения «огненного шара» (вершина 104) и комбинированного сценария, включающего все ранее перечисленные.

В табл. 2 приведены результаты моделирования. В графах 3 и 4 указаны значения вероятностей и интенсивностей возникновения различных видов аварий в течение одного года для одного транспортного средства.

В графе 5 в порядке убывания значимости указаны номера элементов модели (рис. 1, табл. 1). В скобках указаны элементы, имеющие одинаковую значимость. Подчеркиванием выделены факторы, способствующие развитию аварии. Курсивом выделены факторы, препятствующие возникновению аварии, которые определяют саму возможность возникновения аварии.

Таблица 2

Результаты расчета вероятности аварий

№ п/п	Вид аварии	Вероятность аварии	Интенсивность, 1/г.	Значимость параметров (по убыванию)
1	Химическое заражение	$3.634 \cdot 10^{-3}$	$6.413 \cdot 10^{-4}$	6, (1-3), <u>9</u>
2	Взрыв паров ЛВЖ	$1.043 \cdot 10^{-2}$	$5.209 \cdot 10^{-4}$	(1-3), <u>9</u> , (11-13), 15, 10
3	Пожар пролива ЛВЖ	$1.043 \cdot 10^{-2}$	$5.209 \cdot 10^{-4}$	(1-3), <u>9</u> , (11-13), 16, 10
4	«Огненный шар»	$6.839 \cdot 10^{-4}$	$8.319 \cdot 10^{-4}$	(2, 3), 5, (<u>11-13</u>), 7
5	Комбинированная	$1.543 \cdot 10^{-2}$	$4.762 \cdot 10^{-4}$	(2, 3), 1, <u>9</u> , 6, (<u>11-13</u>)

Расчет вероятности возникновения аварий на коммуникациях. Каждое транспортное средство в течение одного года проходит какое-то среднее расстояние l_{cp} км. Предполагая, что авария транспортного средства в любой точке движения равновероятна, можно оценить значение вероятности возникновения аварии в любой точке маршрута движения:

$$p_{ав}(x, y) = \sum_i^{N_1} \frac{p_i}{l_i} \cdot N_1 = \frac{p_{cp}}{l_{cp}} \cdot N_2 \text{ 1/км,}$$

где $p_{ав}(x, y)$ – вероятность аварии в точке с координатами (x, y) ; N_1 – число транспортных средств, перевозящих опасные грузы и проходящих в течение 1 года через точку с координатами (x, y) ; p_i – вероятность аварии транспортного средства в течение 1 года; l_i – пробег транспортного средства в течение 1 года.

Например, если через железнодорожную станцию ежедневно проходит 30 цистерн с аммиаком емкостью 60 т с ежегодным пробегом каждой цистерны 10^5 км/г., то вероятность аварии на 1 км пути – $p_{ав}(x, y) = 3.94 \cdot 10^{-4}$. При движении бензовозов по автомагистрали с интенсивностью 5 машин в час со среднегодовым пробегом бензовоза $4 \cdot 10^4$ км/г. вероятность аварии на 1 км пути – $p_{ав}(x, y) = 1.42 \cdot 10^{-2}$.

Построение зон потенциального территориального риска при химических авариях. Оценка последствий предполагает пространственное моделирование действия поражающих факторов (ударная волна при взрыве, термическое воздействие при пожаре и распространение токсичного облака при химической аварии) и построение зон, определяющих границы интенсивности проявления опасных факторов.

Расчет последствий различных видов аварий (см. рис. 1) выполняется на основе методик, описанных в [4], [5]. Зона территориального риска [4] при взрывах и пожарах представляет собой круг, радиус которого определяется размерами соответствующих зон поражения. Особым случаем является построение зон территориального риска при химической аварии [5]. Это обусловлено тем, что размеры зон зависят от физических характеристик вещества, температуры и состояния атмосферы и от направления ветра. Так, при определенных погодных условиях, например при температуре свыше $+20$ °С, размеры химического заражения местности аммиаком могут достигать нескольких километров, что существенно превосходит размеры зон поражения при взрывах и пожарах.

Температура и состояние атмосферы в данный момент учитываются при моделировании масштабов аварии. Для учета построения зоны территориального риска химической аварии необходимо учитывать направление и скорость ветра, характерные для определенной местности. Для этого предлагается использовать следующий алгоритм.

Для каждого направления ветра α выполняется расчет приведенного радиуса аварии R_α на основании информации о сезонной повторяемости и силе ветра различных направлений:

$$R_\alpha = R_{ав} \cdot k_w(\alpha) \Big|_{\alpha=0^\circ}^{360^\circ},$$

где α – угол относительно направления на север, град.; R_α – размер зоны в направлении α °, м; $R_{ав}$ – расчетная величина зоны заражения при химической аварии, полученная по результатам моделирования масштабов аварии; $k_w(\alpha)$ – коэффициент приведения с учетом скорости ветра. Последний определяется выражением:

$$k_w(\alpha) = \frac{w_0^2}{w_\alpha^2} \cdot \frac{\beta(\alpha)}{\sqrt{\beta^2(\alpha_{max}) - \beta^2(\alpha_{min})}},$$

где w_0 – скорость ветра, принятая при расчетах зон заражения $R_{ав}$, м/с; w_α – средняя скорость ветра направлением α град. в течение сезона, м/с; $\beta(\alpha)$ – повторяемость ветра направлением α град. в течение сезона, %; $\beta(\alpha_{min})$, $\beta(\alpha_{max})$ – минимальное и максимальное значения повторяемости ветра различных направлений, %.

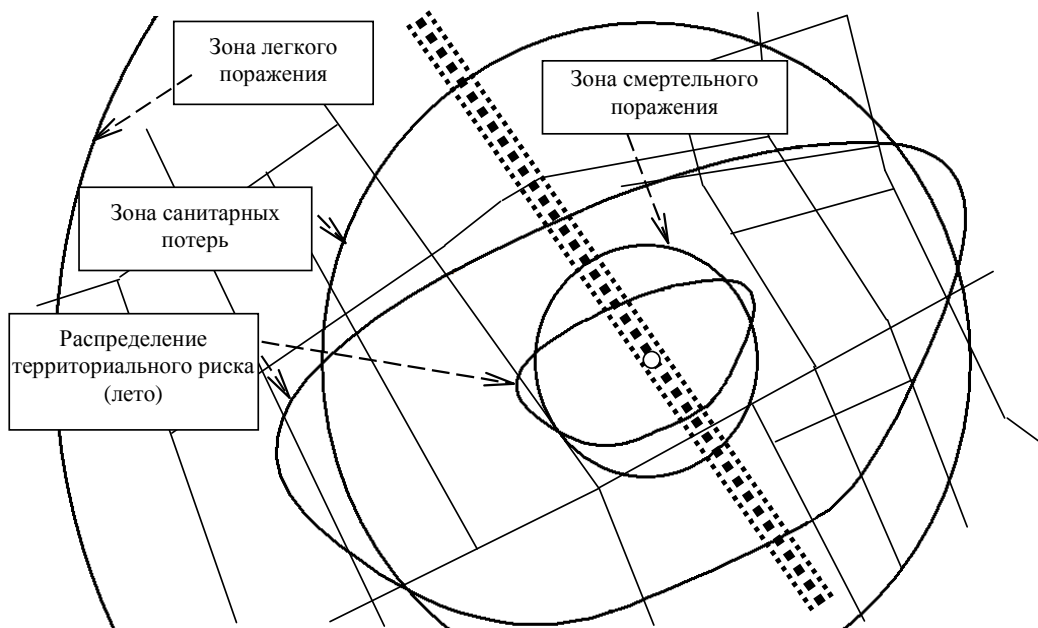


Рис. 2. Распределение территориального риска при аварии железнодорожной цистерны

На рис. 2 представлены результаты построения зон возможного заражения местности и зон территориального риска химической аварии, произошедшей при разливе 60 т аммиака в результате взрыва железнодорожной цистерны.

Оценка риска при химической аварии. При возникновении химической аварии на железнодорожной сортировочной станции с выбросом 60 т аммиака (см. рис. 2) в летнее время (температура + 20 °С) при ветре 1 м/с зона смертельного поражения людей составит 687 м². Предположим, что в зону смертельного поражения попадают: 10 многоквартирных домов (~300 – 360 квартир); 2 малоквартирных дома (~ 50 квартир); 1 школа (~1000 человек); 1 детский сад (~200 человек). Тогда максимальное число жителей в зоне смертельного поражения составляет 11 000 человек. Ожидаемое время подхода токсичного облака к жилым зданиям – 4 минуты. Ожидаемый процент потерь: при нахождении на улице (без средств защиты) – 70–100 %; при нахождении в зданиях с закрытыми форточками – 10–20 %. Возможное число потерь: погибших – до 2000 человек; пораженных, требующих оказания медицинской помощи, – до 3500 человек.

Ожидаемый материальный ущерб включает страховое возмещение на одного погибшего – 100 000 р., на лечение одного пострадавшего – не менее 15 000 р. Суммарный социальный ущерб от аварии может составить 252.5 млн. р. Следует отметить, что полученная цифра не учитывает прямого ущерба от аварии и затрат на ее ликвидацию.

Риск возникновения аварий определяется как математическое ожидание ущерба от аварии и вычисляется как произведение вероятности события и ущерба $H = p_{ав} \cdot C$, где H – величина риска аварии, $p_{ав}$ – вероятность реализации аварии, C – ожидаемый ущерб от аварии (число пострадавших или величина материального ущерба). *Риск поражения* людей и возможного *социального ущерба* при химической аварии с выбросом 60 т аммиака, произошедшей в летнее время (см. рис. 2), определяется, соответственно, по формулам

$$H_{II} = p_{ав}(x, y) \cdot C_{II} = 3.94 \cdot 10^{-4} \cdot 5500 = 2.167 \text{ чел./г.},$$

$$H_y = p_{ав}(x, y) \cdot C_y = 3.94 \cdot 10^{-4} \cdot 252.5 = 99.485 \text{ тыс. р./г.},$$

где $p_{ав}(x, y)$ – вероятность возникновения химической аварии на 1 км пути в течение одного года; $H_{п}$ – риск поражения людей, характеризующий возможные последствия химической аварии; $C_{п}$ – ожидаемое число пострадавших при химической аварии (сумма погибших и получивших токсическое отравление); H_y – риск нанесения социального ущерба, характеризующий возможные последствия химической аварии; C_y – ожидаемый материальный ущерб при химической аварии (сумма погибших и получивших токсическое отравление).

Полученные значения риска характеризуют частоту гибели людей (1/г.) и ожидаемый ущерб (р./г.) от возможной химической аварии. Значения показателей риска $H_{п}$, H_y могут использоваться:

- при расчете страховых взносов для компаний-перевозчиков опасных грузов;
- при формировании фондов ликвидации чрезвычайных ситуаций;
- при оценке потенциальной опасности территорий и при страховании населения.

Рассмотренная методика оценки риска ориентирована на решение задач анализа безопасности транспортных объектов и коммуникаций. Используемый математический аппарат позволяет рассчитать вероятности возникновения аварий различных классов, оценить возможные последствия аварий и построить зоны территориального риска.

Полученные значения вероятности аварии, с учетом рекомендаций [2], могут стать основой для принятия решений об уровне безопасности транспортных объектов и коммуникаций, а также о необходимости разработки и реализации мероприятий по снижению опасности аварии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.97 № 116-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. 1997, № 30, ст. 3588.
2. РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов // Федеральный горный и промышленный надзор России (Госгортехнадзор России). М.: Изд-во Госгортехнадзора России, 2001.
3. Можаяев А. С., Громов В. Н. Теоретические основы общего логико-вероятностного метода автоматизированного моделирования систем. СПб.: Изд-во ВИТУ, 2000.
4. Корсаков В. И. Расчет зон чрезвычайных ситуаций: Учеб. пособ. СПб.: Изд-во ЛТА, 1997.
5. Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте. М.: Штаб ГО СССР, 1990.

I. V. Stepanov

ESTIMATION OF TRANSPORT COMPLEXES SAFETY

The method of an estimation of transport complexes safety, founded on calculation of risk parameters, is offered. The model of an estimation of territorial and social risk is designed at originating emergencies, bound with transportations of hazardous freights on automobile and railway transport.

ПЕРЕХОД К ТЕСТ-ОРИЕНТИРОВАННОЙ РАЗРАБОТКЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Сформулированы ограничения традиционных подходов к разработке программного обеспечения, изложены сущность тест-ориентированного программирования (ТОП) и его преимущества. Даны рекомендации по применению ТОП в реальном проекте.

Тест-ориентированное программирование, рефакторинг, автоматический тест, модульный тест, тест-ориентированная разработка

Ограничения традиционных подходов к разработке программного обеспечения. Наиболее распространенная модель разработки программного обеспечения заключается в последовательном выпуске версий, постепенно расширяющих функциональные возможности системы. В зависимости от масштаба проекта и организации процесса разработки на выпуск версии может уходить от двух недель до двух–трех месяцев. В течение этого периода формулируются функциональные требования для данной версии, осуществляется проектирование, создается функциональный код, выполняется окончательное тестирование и подготовка продукта к отгрузке [5, с. 110, 117].

Выпуск каждой версии связан со значительным периодом стабилизации и тестирования продукта. Основная задача этого этапа – убедиться, что все части системы работают согласованно, сократить количество ошибок до приемлемого уровня и получить пригодный для выпуска продукт: «золотую версию» [5, с. 482]. Поначалу затраты на стабилизацию и тестирование могут достигать приемлемых величин, однако со временем объем подлежащей регулярному тестированию функциональности и сложность стабилизации растут. Функциональностью (здесь и далее) будем называть свойства программы, соответствующие спецификации. Спецификация может составлять в различных взаимодополняющих формах: текстовых описаниях, «историях» функционирования, диаграммах внутреннего устройства, диаграммах использования и т. д. Автор считает тесты одной из форм специфицирования поведения программы [2, с. 23].

Основная сложность тестирования заключается в том, что при каждом выпуске необходимо проверять весь накопленный объем функциональности. Если тестирование осуществляется вручную, то цикл поиска ошибок, их устранения и повторного тестирования занимает слишком много времени [3, с. 43, 44].

В таких случаях стараются выпускать новые версии как можно реже, а функциональные требования фиксировать на самых первых этапах. Подобная ситуация невыгодна заказчику, так как мешает оперативно реагировать на изменения в бизнесе и корректировать процесс разработки исходя из сложившейся ситуации. Разработчикам длительное тестирование и стабилизация тоже не выгодны, поскольку объем работ при этом растет и, соответственно, увеличивается себестоимость продукта.

Ситуация несколько улучшается с внедрением автоматических тестов системного уровня, проверяющих функциональные требования к системе в целом. В таких случаях стоимость тестирования значительно снижается, однако время проведения тестов по-прежнему остается большим. Обычно полномасштабный системный тест занимает от нескольких часов до нескольких дней. Большое время проведения системных тестов не позволяет постоянно держать систему в полностью отлаженном состоянии, и основными проблемами такого подхода являются непредсказуемость проявления проблем на этапе стабилизации и согласования различных частей системы в процессе разработки [1, с. 128].

Кроме того, одна небольшая ошибка в системе может привести к отказу нескольких тестов, причем место ошибки можно определить лишь приблизительно, что значительно усложняет диагностику.

Ключом к эффективной отладке и снижению стоимости выпуска версий является тест-ориентированное программирование (ТОП¹). Его основная задача – создание автоматических функциональных тестов системы, которые:

- выполняются очень быстро – секунды, минуты, но не часы;
- абсолютно не зависят друг от друга — прохождение или отказ одного из тестов никак не влияет на срабатывание остальных;
- проверяют только небольшую часть системы, независимо от остальных частей, что, в частности, позволяет быстро локализовать источник проблемы.

Последняя особенность является наиболее существенной, поскольку независимость тестов только от проверяемых ими частей программы значительно влияет на их быстродействие и простоту поиска ошибок. В таких программах ошибка может быть связана только с небольшой тестируемой частью или с самим тестом.

В следующих разделах будет кратко описан процесс получения таких тестов (с указанием ссылок на более подробные источники), указаны дополнительные преимущества ТОП и даны рекомендации по переходу к ТОП в уже запущенных проектах.

Что такое ТОП? ТОП – это стиль программирования, в котором используются стратегии проектирования и кодирования, обусловленные необходимостью разрабатывать детальный набор блочных тестов. Сущность этих стратегий заключается в двух простых правилах:

- перед тем как написать любой фрагмент функционального кода, создается (или модифицируется) *автоматический тест*, который поначалу не *срабатывает*;
- после обеспечения срабатывания теста проводится *рефакторинг* и устраняется дублирование [1, с. 19]; [2, с. 218].

Уточним выделенные термины «автоматический тест», «срабатывает» и рефакторинг. Автоматическим тестом называется метод без параметров, который генерирует исключение, когда поведение функционального кода отличается от требуемого. Срабатыванием теста называется его выполнение без непредвиденных ошибок, то есть не приводящее к исключениям, обрабатываемым вне данного метода.

¹ В публикациях на английском языке используется аббревиатура TDD – Test Driven Development.

Рефакторинг (от английского *refactoring*) называется упрощение функционального кода без потери функциональности. В русскоязычной литературе иногда встречаются другие переводы данного термина: «реорганизация» и «переработка».

Чтобы определить, срабатывает ли тест, в ТОО используется небольшая программа, которая:

- создает экземпляр тестового класса (класса, содержащего тестовые методы);
- запускает тестовый метод, перехватывая возможные исключения, и фиксирует результаты запуска;
- выводит отчет о результатах выполнения тестов.

Есть три существенных особенности, которые отличают ТОО от других видов разработки, основанных на тестировании.

1. *Возможность быстрой диагностики системы.* Для обеспечения такой возможности выполнение тестовых методов должно происходить достаточно быстро и не требовать никакого вмешательства со стороны пользователя. Это позволяет запускать тестовые методы очень часто, постоянно проверяя поведение разрабатываемого кода и остальной системы, на которые он, возможно, влияет.

2. *Подход к процессу разработки,* при котором сначала формулируются в виде теста требования, а затем реализуется код, выполняющий эти требования.

3. *Зависимость тестовых методов только от тестируемого кода.* Важно чтобы тестовый метод проверял только ту часть функционального кода, для которой он был написан, так как это существенно упрощает диагностику и повышает быстродействие тестов. Необходимо свести к минимуму зависимость теста от не проверяемого им кода. В большинстве случаев для этого необходимо проектировать функциональный код с учетом возможностей тестирования.

Более подробно процесс тест-ориентированного программирования можно представить в виде следующих повторяющихся этапов.

1. Написание автоматического теста, характеризующего некоторое приращение функциональности (или изменения теста, в случае изменения функциональности).

2. Компиляция тестов. Обычно для этого требуется добавить новые или изменить имеющиеся классы или методы в соответствии с тем, как они использовались в тесте. Другими словами, на этом этапе реализуется интерфейс, к которому обращается тест, и производится проверка путем компиляции.

3. Запуск всех связанных тестов и проверка того, что новый (и только новый) тест не срабатывает. Иногда ошибки проявляются в уже имеющемся коде. В таких случаях нужно отменить последние изменения и устранить проблему до начала работы над новой функциональностью. Возможность отката изменений в случае появления ошибок – одна из причин проверять новый код как можно раньше. Этот этап необходим, даже если вы совершенно уверены, что новый тест не будет работать, поскольку вы можете ошибаться чаще, чем ожидаете.

4. Обеспечение срабатывания нового теста. На этом этапе следует использовать наиболее простую реализацию: если правильная реализация очевидна, необходимо написать ее, если нет – «подделать», т. е. написать реализацию, которая обеспечивает только срабатывание этого теста. На данном этапе важно как можно быстрее получить «зеленый свет». Работать над «правильностью» реализации лучше на следующем этапе, когда ее можно проверить с помощью теста.

5. Проведение рефакторинга и устранение дублирования кода, реализующего одни и те же функции. Результатом данного этапа должен стать простой код, который можно легко модифицировать в будущем.

Первые четыре этапа должны выполняться как можно быстрее, а последний – как можно более тщательно. При начале работы над новой функциональностью (с теста) можно и даже желательно нарушать правила хорошего дизайна ради скорости (копировать код через буфер обмена и т. п.). «Наша цель – правильно спроектированный код, который работает» [1]. Сначала мы создаем код, «который работает», затем выполняем качественное проектирование. Это обусловлено тем, что менять уже работающий быстро написанный код проще, чем пытаться заранее правильно спроектировать его, а потом, столкнувшись с отличиями поведения системы от предполагаемого при проектировании, заставить код работать. Кроме того, после выполнения пробной реализации последующее проектирование осуществляется значительно более качественно.

Проводя рефакторинг и устраняя дублирование, мы максимизируем наши шансы добиться нужной функциональности ценой всего одного изменения в будущем. В противном случае объем недоработок начинает расти и сложность получения или изменения функциональности быстро увеличивается. Это приводит к необходимости глобального рефакторинга, который существенно сложнее и дороже постепенного рефакторинга отдельных частей. Естественно, уровень дизайна не должен быть идеальным: чем чаще предполагается менять функциональность и чем больше она связана с другими частями (т. е. ближе к ядру системы), тем большее внимание следует уделить дизайну.

Для эффективного использования общей тестовой функциональности также необходим рефакторинг. Вообще, рефакторинг тестовых классов мало отличается от рефакторинга функционального кода: он должен проводиться вместе с ним и необходим по тем же причинам. Для тестов, которые находятся на периферии системы или заведомо просуществуют недолго, рефакторинг не имеет большого значения. Но если вы собираетесь использовать тест на протяжении всего жизненного цикла системы, лучше, если он будет написан качественно.

Преимущества ТОП. Можно выделить четыре основных преимущества, которые дает ТОП:

1. *Повышение качества дизайна и квалификации разработчиков.* Поскольку реализация любой функциональности ориентирована на срабатывание теста, а тесты представляют шаги приращения функциональности, которые удобны разработчикам в данный момент, разработчики получают возможность очень быстро проверить свои решения на практике.

2. *Большая понятность кода.* Каждый связанный с функциональным элементом тест не только доказывает корректную работу данного элемента, но является примером, показывающим, как лучше его использовать. Проверенный код, снабженный примерами, значительно проще использовать при работе в команде.

3. *Возможность адаптации к конкретным условиям.* Если код достаточно тривиален для разработчика, он может писать тесты более высокого уровня для более быстрого продвижения вперед. А если дела идут плохо и ошибки проявляются часто, можно увеличить плотность тестирования и двигаться вперед более короткими (но зато более уверенными) шагами. Правильным шагом приращения функциональности является такой шаг, который позволяет пройти весь цикл ТОП от написания теста до рефакторинга быстро (за минуты или десятки минут, но не часы), реализовав при этом максимум функциональности.

4. *Управляемость процесса разработки.* Большинство дефектов выявляется и устраняется в процессе разработки, а не на более поздних этапах. Разработчики более точно знают, когда работу можно считать законченной. Код становится более изученным, а значит – более предсказуемым. За счет этого упрощается прогнозирование и улучшается планирование [1, с. 10].

Кроме перечисленных преимуществ, программирование в стиле ТОП дает чувство уверенности в разрабатываемой системе, которое трудно передать. Заказчики ожидают от новых версий новой функциональности, а не появления проблем. Коллеги-программисты начинают больше доверять чужому коду и быстрее осваивают работу с ним (на примерах из тестов), а процесс программирования становится значительно менее нервным. Если программирование осуществляется парами, написание небольших тестов позволяет точно определить, над какой именно функциональностью будет вестись работа [1, с. 211].

Рекомендации по переходу к ТОП. Для применения ТОП требуется некоторый уровень профессионализма исполнителей. Поэтому применение ТОП чаще всего начинается с задачи приложения к уже существующему проекту. Обычно переход к новому методу работы или системе программирования на уже существующем проекте требует значительных вложений. К счастью, в случае ТОП это не совсем так. Его внедрение сравнимо с внедрением объектно-ориентированного программирования. То есть возможен плавный переход, при котором вы постепенно «включаете» новые принципы (или особенности) ТОП по мере освоения предыдущих.

Для начала вам необходимо иметь программу, соответствующую вашему языку программирования, которая может запускать ваши тесты и показывать результаты запуска. Для Java такая программа – JUnit – входит в число свободно распространяемых с открытым исходным кодом [2, с. 34]. Для Delphi (популярного в странах бывшего СССР) вы можете получить такую программу от автора по электронной почте (bortsov@mail.ru). Или же вы можете написать такую несложную программу самостоятельно. Главное в программе запуска модульных тестов – это простота.

После этого вы могли бы, например, начать реализацию новой функциональности с подготовки теста. Хорошо, если первые тесты будут отражать функциональные требова-

ния (или их конкретизировать) и если они будут достаточно небольшими для быстрой реализации. После того как вы напишете несколько тестов и определите, как лучше их реализовывать, вы сможете наращивать темпы, но для начала рекомендуется научиться двигаться медленно. Таким образом, вы находите «правильный» шаг приращения функциональности, который позволяет выполнять весь цикл тест-ориентированной разработки (тест–компиляция–реализация–рефакторинг) в течение примерно десяти–двадцати минут.

После этого вы уже программируете в стиле ТОП и можете постепенно улучшать процесс разработки, опираясь на перечисленные ранее особенности и вводя собственные усовершенствования.

Достаточно часто при переходе к ТОП программисты попадают в ситуацию, где, как им кажется, просто не существует эффективного способа протестировать работу их классов. Тогда, вместо того чтобы ломать себе голову над вопросом «как же мне протестировать такую программу?», задайте себе вопрос «как я мог написать эту программу так, что ее невозможно протестировать?». Результатом такого сдвига в сознании обычно является изменение дизайна в сторону появления новых функциональных элементов, служащих только для повышения тестируемости программы. Не беспокойтесь, обычно классы и интерфейсы, выделенные для тестирования, оказываются полезными в дальнейшем.

В действительности, ориентируя дизайн на тесты, вы требуете от своей программы уменьшения взаимозависимостей между классами и простоты повторного использования и поддержки. В конце концов, это тест-ориентированное программирование, и именно ориентация на тест побуждает вас писать программу лучше.

Заключение. Подобно тому, как многие шаблоны проектирования добавляют к системе классы и методы, служащие только для простоты поддержки, расширяемости и возможности повторного использования кода программы [4, с. 38], в ТОП предлагается создание новых классов, служащих только для автоматической диагностики программы.

В то же время возможность быстрой автоматической диагностики программы оказывает самое серьезное влияние на процесс разработки. Наиболее существенным является то, что она помогает избежать экспоненциального роста стоимости внесения изменений.

В настоящее время многие свойства языков программирования предназначены для повышения эффективности объектно-ориентированного программирования. Вполне вероятно, что в будущем, наряду с поддержкой ориентации на объекты, возможности создания автоматических тестов будут включены в языки программирования и значительно расширены. С языком Java это уже начинает происходить. Предполагается, что следующие версии включают в себя более мощные системы документирования связанного с кодированием, системы типов и формальных утверждений (assertions).

Подобно тому, как объектно-ориентированное программирование повысило уровень, на котором мы можем повторно использовать и расширять существующую программу, тест-ориентированное программирование способствует повышению устойчивости наших программ – как старых, так и новых.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бэк К. Экстремальное программирование: разработка через тестирование. Библиотека программиста. СПб.: Питер. 2003.
2. Ален Э. Типичные ошибки проектирования. СПб.: Питер. 2003.
3. Бэк К. Экстремальное программирование. СПб.: Питер. 2002.
4. Приемы объектно-ориентированного программирования. Паттерны проектирования / Э. Гамма, Р. Хельм, Р. Джонсон, Дж. Влсидес. СПб.: Питер. 2003.
5. Microsoft Corporation. Принципы проектирования и разработки программного обеспечения. Учеб. курс MCSD: Пер. с англ. М.: Издательско-торговый дом «Русская Редакция». 2000.

M. Ju. Bortsov

TEST-DRIVEN SOFTWARE DEVELOPMENT FOR CURRENT AND FUTURE PROJECTS

The basics of test-driven software development are discussed in this paper. Consideration goes from the limitations of common iterative approaches to the essence of test-driven development, unit testing and their major advantages. Application of the represented approach to already running projects is also briefly discussed.