СОДЕРЖАНИЕ

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ БЕЗОПАСНОСТИ, НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

Грущанский В. А., Юрков Н. К.
О ФОРМАЛИЗАЦИИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ КОМПЛЕКСНЫХ ПРОГРАММ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ И РИСКА 3

Дедков В. К.
ВЫБОР ВАРИАНТА ПРОЕКТИРУЕМОЙ СИСТЕМЫ ПРИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ УСЛОВИЙ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ 10

Юрков Н. К.
ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ 15

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Фесечко А. И.
К ПРОБЛЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ 22

Пимкин А. Д.
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ ФАБРИ–ПЕРО ПРИ НАКЛОННОМ ПАДЕНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ 27

Дедков В. К.
ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМЫ 40

Можаровский И. С.
К ПРОБЛЕМЕ ИДЕНТИФИЦИРУЕМОСТИ МОДЕЛЕЙ НЕЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ 44

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

Садыков С. С.
ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЭТАЛОНОВ ТРЕХМЕРНЫХ ОБЬЕКТОВ ДЛЯ ИХ РАСПОЗНАВАНИЯ 51

Петелин К. С.
К ПРОБЛЕМЕ СИСТЕМНО-ПРОЦЕССНОГО ПОДХОДА В УПРАВЛЕНИИ СЛОЖНЫМ НАУКОЕМКИМ ПРЕДПРИЯТИЕМ 59

Жаднов В. В.
РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ
ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ И СИСТЕМ 65

Федорович В. А., Пыжов И. Н., Бабенко Е. А., Клименко В. Г.
ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА АЛМАЗНОГО
ШЛИФОВАНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ
СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ 74

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ И ПРОИЗВОДСТВЕ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Михеев А. М., Краснощеков П. С.
АЛГОРИТМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ
В ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ ПОДДЕРЖКИ
УДАЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА 81

Лапшин Э. В.
ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ,
ПРОТЕКАЮЩИХ В ТРЕНАЖЕРАХ 87

Катуева Я. В.
СТРАТЕГИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ПРОЕКТНОГО РЕШЕНИЯ 94

Забелин С. А. Ергалиев Д. С. Тулегулов А. Д.
ФОРМИРОВАНИЕ ОЦЕНКИ МАКСИМАЛЬНОГО ПРАВДОПОДОБИЯ
С УЧЕТОМ АНОМАЛЬНЫХ ОШИБОК 100

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ БЕЗОПАСНОСТИ, НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

УДК 621.8.019

О ФОРМАЛИЗАЦИИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ КОМПЛЕКСНЫХ ПРОГРАММ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ И РИСКА

В. А. Грущанский, Н. К. Юрков

Современный этап развития человеческого общества характеризуется разработкой и реализацией сложнейших комплексных программ в различных областях целенаправленной деятельности. При этом комплексные программы должны быть взаимоувязаны и направлены на достижение основной цели деятельности – удовлетворение важнейших потребностей человека.

Разработка и реализация таких программ немыслима без всестороннего исследования их эффективности. В недалеком прошлом этим исследованиям придавалось первостепенное значение практически без глубокого анализа других возможных последствий. В то же время любой вид целенаправленной деятельности, кроме очевидной полезности, может сопровождаться целым рядом негативных факторов, представляющих значительную опасность для человека, окружающей среды и особенно для будущих поколений. Исследованиям этой стороны деятельности в прошлом не придавалось должного значения, и в лучшем случае опасные факторы рассматривались на качественном уровне без детальных количественных оценок. В последние годы ситуация резко изменилась. Это связано с лавинообразным ростом числа и последствий техногенных и природных аварий и катастроф, хищническим расходом и распродажей природных ресурсов, с конфликтами различного уровня и т.д.

К проблемам обеспечения безопасности в настоящее время привлечено внимание ученых и специалистов в самых различных областях деятельности, общественных объединений, многих стран мира и всего мирового сообщества [1, 2]. В последние годы под эгидой Вычислительного центра им. Дородницына РАН проведены три Международные научные конференции по направлению «Фундаментальные проблемы системной безопасности» [3].

Особенно остро эти проблемы стоят в России. Это связано с резкими изменениями условий, касающихся взаимоотношений внутри страны и между странами, бесконтрольным рынком, конверсией оборонного комплекса, распадом ряда структур государственного аппарата и др.

Комплексное решение проблем обеспечения безопасности и устойчивого развития требует взаимоувязанного сбалансированного исследования как полезности (эффективности) различных видов целенаправленной деятельности, так и негативных ее последствий, связанных с полным спектром возможных опасностей природного, техногенного и конфликтного характера.

Научное направление исследований в такой постановке получило краткое обозначение – «системная безопасность», отражающее [1]:

– обеспечение баланса эффективности и безопасности деятельности;
– учет полного спектра опасных факторов;
– разработку исчерпывающей системы мер безопасности;

– учет взаимоувязанной совокупности аспектов деятельности (политического, социального, экономического, оборонного, научно-технического);

– учет всех этапов жизненного цикла программ и систем (разработка, создание, эксплуатация, модернизация, утилизация).

Заметим, что научные разработки для количественного анализа эффективности деятельности в настоящее время достаточно развиты и широко опубликованы, например [4–6]. Научные работы в области безопасности исследованы в меньшей степени. Для принятия взвешенных решений при разработке и реализации комплексных программ необходимо проведение взаимоувязанных исследований как эффективности, так и безопасности с количественным сопоставлением результатов и последствий реализации программ по этим показателям.

Эффективность комплексных программ и систем может быть оценена на основе моделирования соответствующих операций деятельности, учитывающих взаимодействие систем (которые в общем случае могут иметь противоположные интересы), условия операций, реакции со стороны систем более высокого уровня иерархии и другие факторы [4, 6].

В качестве показателей эффективности $\boldsymbol{W}$ могут рассматриваться:

– непосредственно эффективность достижения цели P (например, вероятность решения задач, обеспечивающих достижение цели);

– стоимость или другие затраты ресурсов C, обеспечивающих достижение цели;

– сроки реализации программ T при заданных затратах;

– степень реализуемости программ ρ при заданных располагаемых ресурсах и сроках.

Количественные оценки безопасности $\boldsymbol{B}$ программ могут базироваться на основе определения вероятностей снижения опасных факторов до уровней, которые рассматриваются как безопасные для объекта защиты в течение заданного интервала времени.

В качестве показателей безопасности могут рассматриваться:

– степень снижения риска возникновения опасности $\Delta_r = 1 - r$;

– степень риска r;

– вероятность предотвращения риска, превышающего допустимый уровень $P(r > r_{\text{доп}})$;

– математическое ожидание предотвращенного ущерба $M_{\text{у}}$ и др.

Пусть все показатели $\boldsymbol{W}$ и $\boldsymbol{B}$ приведены к такому виду, что увеличение их значений выгодно лицу, принимающему решение (ЛПР). Этого можно добиться, например, сменой знака или рассмотрением обратной величины. В основу оценок безопасности также может быть положено моделирование соответствующей операции взаимодействия опасных факторов и мер их парирования в определенных условиях. Не привязываясь к конкретным комплексным программам, рассмотрим в общем виде вопросы формализации оценок эффективности и безопасности. Для краткости обозначим векторные показатели эффективности и безопасности $\{\boldsymbol{W}, \boldsymbol{B}\} \leftrightarrow \boldsymbol{F}$, так как принципы сопоставления вариантов программ и систем и выбора рациональных могут быть идентичны. При этом предполагаем, что векторные показатели $\boldsymbol{W}$ и $\boldsymbol{B}$ определяются по известным методикам и моделям, учитывающим специфику конкретных программ и систем.

Пусть $\boldsymbol{V}$ – множество вариантов рассматриваемых программ (для общности рассуждений в качестве программы можно рассматривать отдельные разработки систем, образцов сложных технических систем и т.д.). Тогда для некоторого варианта $v \in \boldsymbol{V}$ векторный показатель последствий рассматриваемой операции представится в виде

$$\boldsymbol{F}(v) = \{\boldsymbol{F}_1(v), \boldsymbol{F}_2(v), \ldots, \boldsymbol{F}_s(v), \ldots, \boldsymbol{F}_n(v)\}, \tag{1}$$

где $\boldsymbol{F}_s(v), s = \overline{1,k}$ – составляющая векторного показателя (эффективности или безопасности) при реализации варианта программы в заданных условиях.

Зависимость (1) может быть конкретизирована для показателей эффективности и безопасности с учетом выделенных выше примеров показателей рассматриваемых последствий деятельности:

$$\boldsymbol{W}(v) = \{P(v), C(v), T(v), \rho(v), \ldots\},$$

$$\boldsymbol{B}(v) = \{\Delta_r(v),\ r(v),\ P(r > r_{доп}, v),\ M_{\text{у}}(v), \ldots\}. \tag{2}$$

Если зависимости типа (2) и обобщенного типа (1) могут быть определены для каждого варианта программы $v \in \boldsymbol{V}$, то задача состоит в формировании множества допустимых стратегий $\boldsymbol{v} \in \boldsymbol{V}$ с учетом заданных ограничений и в выборе одной из них $v^* \in \boldsymbol{V}$, обеспечивающей рациональное сбалансированное соотношение «эффективность – безопасность». Выбор v^* может производиться на основе некоторого критерия выбора R (или формализованного решающего правила, позволяющего сопоставлять варианты стратегий и осуществлять направленный выбор рационального v^* из допустимого множества $v \in \boldsymbol{V}$).

Наиболее общим случаем выработки взвешенных решений является наличие векторного показателя $\boldsymbol{F}(v)$ и высокая степень неопределенности условий операции $u \in \boldsymbol{U}$. Неопределенность может быть связана с нечеткой или неоднозначной формулировкой задачи операции, с условиями проведения операции, которые заранее неизвестны, с активным противодействием достижению цели и другими факторами. Пусть варианты условий операции могут быть заданы конечным множеством вида

$$U = \{u_1, u_2, \ldots, u_j, \ldots, u_m\},$$

где u_j, ($j = \overline{1,m}$) – j-я группа некоторых однородных условий, позволяющая определить обобщенный показатель $F(v_i, u_j)$ для стратегии (варианта программы v_i и условий u_j).

Здесь для наглядности рассматривается случай, когда программа (система) ориентирована на решение одной обобщенной задачи.

Тогда матрица возможных решений и соответствующих им обобщенных показателей $F(v_i, u_j)$ может быть представлена в виде

v	u_1	u_2	…	u_j	…	u_m	$F_o(v)$
v_1	$F(v_1, u_1)$	$F(v_1, u_2)$	…	$F(v_1, u_j)$	…	$F(v_1, u_m)$	$F_o(v_1)$
v_2	$F(v_2, u_1)$	$F(v_2, u_2)$	…	$F(v_2, u_j)$	…	$F(v_2, u_m)$	$F_o(v_2)$
…	……						…
v_i	$F(v_i, u_1)$	$F(v_i, u_2)$	…	$F(v_i, u_j)$	…	$F(v_i, u_m)$	$F_o(v_i)$
…	……						…
v_n	$F(v_n, u_1)$	$F(v_n, u_2)$	…	$F(v_n, u_j)$	…	$F(v_n, u_m)$	$F_o(v_n)$

(3)

В общем случае показатели в каждой строке матрицы (3) могут быть как одинаковы по смыслу, так и различными в зависимости от условий u_j, например, вида (2). Последний столбец матрицы $F_o(v)$ представляет некоторую свертку значений, учитывающую значения всех показателей каждой строки v_i, $i = \overline{1, n}$. Такое обобщение значений показателей каждой строки определяет решающее правило выбора рациональной стратегии $v^* \in \boldsymbol{V}$. Выбор рациональной стратегии v^* предполагает решение следующих основных задач:

– определение обоснованного выбора свертки $F_o(v)$, $v \in \boldsymbol{V}$;

– выбор такой стратегии $v^* \in \boldsymbol{V}$, при которой $F_o(v)$ принимает максимальное значение, т.е. реализовать формализованное правило выбора:

$$v^* = \{v^* : v^* \in \boldsymbol{V} \Lambda [F_o(v^*) = \max_i F_o(v_i)]\}. \quad (4)$$

Интерес представляет подход, который обобщает ряд известных принципов свертки частных показателей. Этот подход основан на аддитивном объединении трех составляющих для каждой рассматриваемой стратегии $v \in \boldsymbol{V}$ [6]:

– среднее взвешенное по вероятности значение показателей $F\left(v_i,u_j\right),\left(j=\overline{1,m}\right)$;

– максимальное значение показателя $\max\limits_j F\left(v_i,u_j\right),\left(j=\overline{1,m}\right)$;

– минимальное значение показателя $\min\limits_j F\left(v_i,u_j\right),\left(j=\overline{1,m}\right)$.

В общем виде такая свертка показателей может быть представлена в следующем виде:

$$F_o(v_i)=\alpha_1\sum_{j=1}^{m}P_jF\left(v_i,u_j\right)+\alpha_2\min_j F\left(v_i,u_j\right)+\alpha_3\max_j F\left(v_i,u_j\right), \tag{5}$$

причем $\sum\limits_{j=1}^{m}P_j=1;\ (\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3)\geq 0;\ \alpha_1+\alpha_2+\alpha_3=1,$ где $(\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3)$ – весовые коэффициенты соответствующих составляющих; P_j – вероятности появления условий u_j (объективные или субъективно предполагаемые).

Задавая различные сочетания значений P_j, α_1, α_2, α_3, можно получить различные критерии выбора решений в условиях неопределенности и при наличии как скалярного, так и векторного показателя эффективности и безопасности. Приведем отдельные случаи сверток и принципы выбора для них рациональных стратегий v^* [5].

Пусть $\alpha_1=1$, тогда

$$F_o\left(v^*\right)=\max_{\mathrm{i}}\sum_{j=1}^{m}P_jF\left(v_i,u_j\right). \tag{6}$$

Критерий выбора (6) называют принципом наибольшего среднего результата. Эта свертка дает либо средние взвешенные по вероятности, либо средние арифметические значения показателей, из которых выбирается максимальный, определяющий $v^*\in\boldsymbol{V}$. Случай $\{P_j=\mathrm{const}_j,\ \sum\limits_j P_j=1\}$ может рассматриваться в тех ситуациях, когда варианты условий равновероятны или неизвестны, но субъективно предполагаются равновероятными (принцип нейтралитета) [6]. Формализованное правило выбора рациональной стратегии $v^*\in\boldsymbol{V}$ здесь и в дальнейшем будет соответствовать логическому соотношению типа (4).

При $\alpha_2=1$

$$F_o\left(v^*\right)=\max_i\min_j F\left(v_i,u_j\right).$$

Этот критерий называется критерием Вальда (гарантированного результата, пессимизма или максимина).

При $\alpha_3=1$

$$F_o\left(v^*\right)=\max_i\max_j F\left(v_i,u_j\right),$$

что соответствует принципу оптимизма.

При $\alpha_1=0$

$$F_o\left(v^*\right)=\max_i[\alpha_2\min_j F\left(v_i,u_j\right)+\alpha_3\max_j F\left(v_i,u_j\right)],$$

что соответствует критерию Гурвица или принципу пессимизма-оптимизма; $\alpha_2+\alpha_3=1,$ а их соотношение может определяться экспертным путем. Чем опаснее ситуация, тем ближе α_3 к нулю.

При $\alpha_2 = 0$

$$F_o\left(v^*\right) = \max_i[\alpha_1 \sum_{j=1}^{m} P_j F\left(v_i, u_j\right) + \alpha_3 \max_j F\left(v_i, u_j\right)];$$

этот критерий называют принципом сдержанного оптимизма.

При $\alpha_3 = 0$

$$F_o\left(v^*\right) = \max_i[\alpha_1 \sum_{j=1}^{m} P_j F\left(v_i, u_j\right) + \alpha_2 \min_j F\left(v_i, u_j\right)];$$

это критерий сдержанного пессимизма.

Выбором соотношений вероятностей P_j, кроме рассмотренных случаев, могут изучаться и другие. Например, заданием для части вероятностей нулевых значений можно исключить из рассмотрения маловероятные варианты условий при оценке средневзвешенного значения показателей. Варьируя коэффициентами α, можно учесть специфические особенности ЛПР, такие как:

– человек, склонный к риску, может ориентироваться на большие значения коэффициентов α_3 и принимать их близкими к единице;

– если ЛПР – человек осторожный и ориентируется на минимальные значения показателей $F\left(v_i, u_j\right)$, то коэффициент α_2 принимается близким к единице;

– человек, склонный к осторожному риску, ориентируется на средневзвешенные результаты и может принимать наибольшие значения коэффициентов α_1 и перераспределять по своему усмотрению и интуиции с учетом статистических данных вероятности P_j.

При затруднениях в выборе коэффициентов α и распределения P_j может использоваться принцип «относительного пессимизма» или минимального «сожаления», который принято называть принципом Сэвиджа. Для этого строится матрица сожалений вида

$$\bar{F}\left(v_i, u_j\right) = \max_i F\left(v_i, u_j\right) - F\left(v_i, u_j\right). \tag{7}$$

Эта матрица будет иметь вид типа (3), но для «сожалений», т.е. потерь показателя эффективности или безопасности при выборе того или иного варианта по сравнению с вариантом, обеспечивающим максимум показателя для каждого варианта условий. Построив такую матрицу, можно получить свертку сожалений:

$$\bar{F}_o\left(v_i\right) = \max_j[\max_i F\left(v_i, u_j\right) - F\left(v_i, u_j\right)]. \tag{8}$$

Решающее правило по принципу Сэвиджа может выглядеть так:

$$v^* = \{v^* : v^* \in \boldsymbol{V} \Lambda[\bar{F}_o\left(v^*\right) = \min_i \bar{F}_o\left(v_i\right)]\}. \tag{9}$$

Имея матрицу «сожалений» типа (7), свертка показателей может быть получена в виде трех составляющих, аналогично зависимости (5), однако следует иметь в виду, что составляющие матрицы – это потери эффективности или безопасности, поэтому символы max и min необходимо поменять местами и в дальнейшем получить аналогичные зависимости, задавая значения коэффициентам $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ 0 и 1.

Для выбора рационального варианта v^* целесообразно рассматривать все принципы выбора. Пусть на основе тех или иных принципов выделен один или несколько рациональных вариантов из множества возможных решений (программ, систем, образцов и т.д.). Обозначим v_w^* и v_B^* –

множество рациональных вариантов, выбранных по показателям эффективности и безопасности соответственно. Представив эти множества в некотором пространстве возможных решений, можно выделить следующие соответствия рациональных множеств v_w^* и v_B^*:

– указанные множества имеют один общий вариант, обеспечивающий максимальную эффективность и безопасность;

– указанные множества имеют несколько общих вариантов, тогда выбор одного варианта может быть прерогативой ЛПР или потребуется дополнительный анализ других, не рассматривавшихся в моделях факторов;

– указанные множества не имеют общих вариантов.

Последний из указанных случаев является наиболее типичным и требует дополнительного анализа для принятия взвешенного решения. Этот случай объясняется в принципе противоречивым характером требований по эффективности и безопасности. Для пояснения этого тезиса укажем на тот факт (хотя и дискуссионный), что в ряде случаев наивысшая безопасность, например, с позиции экологической обстановки и техногенных факторов, соответствует отсутствию какой-либо деятельности (т.е. минимальной эффективности). Дискуссионность этого утверждения состоит в том, что отсутствие деятельности сопряжено с тем, что основные потребности человека не удовлетворяются.

Выбор рационального варианта, когда нет общих точек указанных множеств, может осуществляться следующим образом:

– принятие взвешенного решения осуществляет ЛПР, отдавая приоритет эффективности либо безопасности;

– расширяются области рациональных вариантов v_w^* и v_B^* путем последовательных уступок – ΔW и ΔB до тех пор, пока множества не обеспечат взаимное перекрытие, включающее не менее одного общего варианта.

Следует отметить, что получение области пересечения множеств, содержащей несколько вариантов (на основе принципов выбора или путем уступок), – это один из способов обеспечения для ЛПР некоторой свободы принятия решений с учетом его индивидуальных особенностей (опыта, интуиции, других психофизиологических факторов).

Рассмотренные в настоящей статье методические подходы и формализованные принципы сбалансированного анализа как эффективности, так и безопасности разработки программ, систем, образцов, других видов деятельности в различных областях даны в плане обсуждения для дальнейшего развития затронутой проблемы.

Список литературы

1. Основы системной безопасности : учеб. пособие / под ред. А. В. Ильичева, Е. В. Тарасова. – М. : МАИ, 1995. – 110 с.
2. Моисеев, Н. Н. Человек и биосфера. Опыт системного анализа и эксперименты с моделями / Н. Н. Моисеев, В. В. Александров, А. М. Тарко. – М. : Наука, 1985. – 272 с.
3. Фундаментальные проблемы системной безопасности. – М. : Вузовская книга, 2008. – Вып. 1. – 568 с. ; 2010. – Вып. 2. – 448 с. ; 2012. – Вып. 3. – 664 с.
4. Ильичев, А. В. Эффективность проектируемой техники. Основы анализа / А. В. Ильичев. – М. : Машиностроение, 1991. – 336 с.
5. Северцев, Н. А. Принципы оценки текущего состояния безопасности динамических систем / Н. А. Северцев // Вопросы теории безопасности и устойчивости систем. – 2012. – Вып. 14. – С. 3–10.
6. Надежность и эффективность в технике : справочник : в 10 т. / ред. совет: В. С. Авдуевский (пред.) [и др.]. – М. : Машиностроение, 1988. – Т. 3. Эффективность технических систем / под общ. ред. В. Ф. Уткина, Ю. В. Крючкова. – 328 с.

УДК 621.8.019

Грущанский, В. А.

О формализации показателей эффективности и безопасности комплексных программ в условиях неопределенности и риска / В. А. Грущанский, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 2. – С. 3–9.

Грущанский Василий Аркадьевич
доктор технических наук,
профессор, ведущий научный сотрудник,
Учреждение Российской академии наук
Вычислительный центр им. А. А. Дородницына РАН
119333, г. Москва, ул. Вавилова, 40.
E-mail: zemni@yamdex.ru

Юрков Николай Кондратьевич
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
440026, г. Пенза, ул. Красная, 40.
(841-2) 56-43-46
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены вопросы сбалансированной увязки эффективности и безопасности комплексных программ для формирования взвешенных решений по их разработке и реализации. Приведены принципы выбора решений в условиях неопределенности и риска при формализованном сопоставлении векторных критериев эффективности и безопасности.

Ключевые слова: эффективность, безопасность, программа, критерий, сложная техническая система, условия.

V. Grushchanskij
doctor of technical science, professor, the scientific worker of the division of safety and nonlinear analysis the establishment of the Russian academy of sciences computer center A. A. Dorodnitsyn
Russian academy of sciences
119333, Moscaw, Vavilova street, 40.
E-mail: zemni@yamdex.ru

N. Yurkov
Doctor of Technical Science, professor, the managing of department construction and the production of radio equipment
Penza state university
440026, Penza, Red street, 40.
(841-2) 56-43-46
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Abstract. Reviewed questions balance the efficacy and safety of integrated programmes for sound decisions on their development and implementation. Are the principles of selection decisions under conditions of uncertainty and risk when formalized compared vector criteria of effectiveness and safety.

Key words: efficiency, security, program, test, complex technical system, conditions.

УДК 519.7

ВЫБОР ВАРИАНТА ПРОЕКТИРУЕМОЙ СИСТЕМЫ ПРИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ УСЛОВИЙ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ

В. К. Дедков

Проектировщик новых технических систем всегда сталкивается **с риском принятия ошибочного решения** в связи с **неопределенностью** целого комплекса возможных условий применения проектируемого изделия.

В этом случае априори принимается решение, что множество всех характеристик условий применения проектируемой системы известно и известны законы вероятностей распределения показателей этих условий.

Однако на момент проектирования известны лишь возможные варианты комплекса условий применения проектируемой системы, и не известно, с какой вероятностью эти варианты могут быть реализованы на практике. Такая обстановка требует специального подхода к выбору оптимального варианта решения **в условиях неопределенности** возможности реализации принимаемого решения.

Неопределенность в процессе проектирования новой технической системы может иметь различное физическое содержание:

– причиной неопределенности может являться отсутствие в соответствующий момент необходимой информации, к примеру, из-за недостаточной изученности явления;

– неопределенность связана с принципиальной непредсказуемостью будущих явлений, даже при достаточной изученности всех закономерностей и связей в настоящем;

– неопределенность относительно будущих условий применения системы связана с сознательным противодействием другой стороны, отстаивающей собственные интересы.

Выбор решения в условиях неопределенности можно рассматривать как разрешение «конфликта» между лицом, принимающим решение (например, конструктором или инженером-испытателем) и «природой», которая олицетворяет собой явления, влияющие на действия этого лица и не зависящие от его воли.

Принципы применения методов «минимакса» и «максимина» при выборе варианта проектируемой системы

Оптимизация решений в условиях неопределенности базируется на использовании принципов математического аппарата теории игр [1].

Смысл этой «игры» заключается в том, чтобы на основе выбранного критерия эффективности функционирования системы принять решение относительно технических показателей проектируемой системы или условий ее применения.

Абстрактная модель простейшей игры предполагает наличие двух игроков, каждый из которых может по собственному усмотрению выбрать одну из возможных стратегий поведения. В результате произвольного выбора каких-то стратегий один из игроков оказывается в выигрыше, а другой – в проигрыше.

Каждый из игроков выстраивает стратегию своего поведения либо на основе максимального размера минимально возможного выигрыша (максимина), либо на основе наименьшего размера максимального проигрыша (минимакса).

Рассмотрим выбор стратегии «игроков» при определении оптимального варианта системы по критерию «функциональной» эффективности. Под функциональной эффективностью технической системы понимается ее приспособленность к выполнению своих основных функций или соответствие системы своему назначению.

Критерии функциональной эффективности системы характеризуют ее приспособленность к выполнению своих задач или соответствие результатов функционирования системы целям ее применения по назначению.

Соответствующие этим критериям **показатели функциональной эффективности** могут принимать следующие формы:

а) показатели, характеризующие наличие данного признака (свойства) у проектируемой системы. В качестве таких показателей используются, например, вероятности выполнения задачи или квантили распределений результата функционирования;

б) показатели, характеризующие средние значения результатов функционирования системы. В качестве показателей эффективности могут использоваться математические ожидания, дисперсии, средние квадратические отклонения и т.п. результатов функционирования.

Пусть «игрок» А может применить для выполнения некоторой операции три **типа летательных аппаратов** (ЛА) $А_1$, $А_2$ и $А_3$. «Игрок» Б противопоставляет игроку А **четыре возможных варианта обстановки**, в которой первый должен применять ЛА. Выигрыш игрока А будем выражать величиной вероятности выполнения задачи (причем задача выполняется лишь один раз, поэтому средние показатели эффективности не применимы). Какой из вариантов, определяющих обстановку операции, применит игрок Б – не известно. Результаты игры двух игроков можно представить матрицей выигрышей (табл. 1), в клетках которой показаны выигрыши игрока А.

Таблица 1

Стратегия игрока А	Стратегия игрока Б				Минимальный выигрыш игрока А
	$Б_1$	$Б_2$	$Б_3$	$Б_4$	
$А_1$	48	33	13	18	13
$А_2$	23	3	8	78	3
$А_3$	53	88	10	13	10
Максимальный проигрыш игрока Б	53	88	13	78	–

По правилам игры каждый игрок может применить любую (но только одну) стратегию, причем его противник не знает, какая именно стратегия будет применена партнером.

Анализируя матрицу выигрышей, видим, что если игрок А выберет первый вариант ЛА ($А_1$), то его выигрыш будет, по крайней мере, не меньше 13, при стратегии противника $Б_3$, а может быть и больше (до 48), если противник применит стратегии $Б_1$, $Б_2$ или $Б_4$.

Точно также при выборе второго варианта ЛА ($А_2$) минимальный размер выигрыша составит 3, а при выборе варианта $А_3$ – 10, хотя максимально возможный вариант выигрыша при этом будет больше (до 78 или 88 соответственно).

Игрок А не знает, как поступит его партнер, а потому, выполнив подобный анализ, остановится на стратегии $А_1$, гарантирующей ему ***максимальный размер минимально возможного выигрыша*** (принцип ***максимина***).

Игрок Б рассуждает так же, как и его партнер, и потому должен остановиться на стратегии $Б_3$, гарантирующей ***наименьший из четырех возможных размеров максимального проигрыша*** – 13 ед. (***принцип минимакса***).

Отсюда следует, что партнеры, будучи знакомы с теорией игр, согласятся на минимальные гарантированные размеры своих выигрышей – проигрышей.

В математической трактовке матрица выигрышей имеет вид

$$A_{[m\times n]} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1i} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & \dots & \dots & a_{2n} \\ \dots\dots\dots & & & & & \\ a_{j1} & a_{j2} & \dots & \dots & \dots & a_{jn} \\ \dots\dots\dots & & & & & \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & \dots & \dots & a_{mn} \end{vmatrix},$$

где a_{ji} – размер выигрыша – проигрыша при выборе игроком А j-й стратегии, а его партнером Б – i-й стратегии. Поведение игроков определяется А – принципом максимина $a_{\text{опт}} = \max_j \min_i a_{ji}$, B – принципом минимакса $b_{\text{опт}} = \min_i \max_j a_{ji}$.

Оптимизация параметров технической системы по критериям экономической эффективности

Какие задачи оптимизации параметров технических систем решаются на основе использования *критериев экономической эффективности*?

Критерии экономической эффективности используются при решении следующих задач: а) при определении величины затрат, требующихся для достижения требуемого эффекта функционирования системы; б) при определении стоимости разработки, производства испытаний и эксплуатации системы, обладающей заданными показателями функционирования; в) для оценки возможности достижения заданных показателей функционирования системы, при использовании имеющихся в наличии ресурсов.

Основным критерием экономической эффективности технических систем является «условие минимума стоимости выполнения задачи» при заданных ограничениях на его технические и эксплуатационные характеристики. В качестве показателя экономической эффективности используются математические ожидания (или средние значения) стоимости каждого из вариантов достижения цели операции с помощью рассматриваемой системы.

Необходимо заметить, что в отличие от цены стоимость выполнения боевой задачи является случайной величиной. Некоторые системы могут оцениваться по косвенному экономическому критерию – максимальному экономическому эффекту выполнения задачи, например, по стоимости предотвращенного ущерба.

Рассмотрим пример применения теории игр к выбору технических решений в процессе проектирования системы, определяющих технические параметры будущей системы при минимальных затратах на достижение цели ее применения.

Подобные задачи возникают при проектировании сложной технической системы, такой, например, как транспортный космический корабль многоцелевого назначения (ТКК), не имеющий аналогов, или другие системы, опыт применения которых к началу проектирования отсутствует. Допустим, что при предварительном анализе установлены четыре наиболее вероятных варианта использования ТКК, отличающиеся значениями базовых орбит вывода, интенсивностью запусков, возможностями стыковки и обмена грузами, составом дежурных групп и т.д.

Предположим, что на основе расчетов были определены варианты ТКК, отличающихся грузоподъемностью, массой, энергетикой, составом оборудования. Значения удельных приведенных затрат на единицу полезной нагрузки, минимальные для каждого варианта, приведены в табл. 2. Приведенная в табл. 2 информация не позволяет принять решение о выборе одного из вариантов ТКК для дальнейшей проработки и проектирования из-за неопределенности возможного способа его применения. Для выбора оптимального варианта ТКК необходимо оценить экономическую эффективность каждого варианта ТКК в различных условиях его возможного применения.

Таблица 2

Вариант ТКК	Вариант возможных условий применения	Удельные приведенные затраты в условных единицах стоимости проекта на единицу полезной нагрузки
I	I	0,30
II	II	0,33
III	III	0,35
IV	IV	0,38

Очевидно, что удельные приведенные затраты на единицу полезной нагрузки любого варианта ТКК (к примеру, первого) в «несвойственных» ему ситуациях (второй, третьей, четвертой) будут выше, чем у вариантов, оптимальных для данных условий. Приведем расчеты удельных приведенных затрат на единицу полезной нагрузки каждого варианта ТКК в различных условиях. Результаты этих расчетов сведем в табл. 3.

Таблица 3

Вариант ТКК	Удельные приведенные затраты в условных единицах стоимости при различных вариантах внешних условий			
	I	II	III	IV
I	0,30	0,48	0,81	0,85
II	0,55	0,33	0,78	0,68
III	0,63	0,93	0,35	0,53
IV	0,98	0,83	0,63	0,38

Приведенная таблица подобна рассмотренной выше матрице выигрышей. Задача выбора варианта ТКК в случае неопределенности информации о внешних условиях может трактоваться как «игра» проектировщика с «природой». Так как элементы матрицы в рассматриваемом примере соответствуют удельным приведенным затратам, то стратегия проектировщика должна отвечать принципу минимакса, т.е. принятое им решение должно обеспечивать минимизацию максимально возможных затрат независимо от того, какой вариант внешних условий будет иметь место в будущем. Максимальные значения удельных приведенных затрат приведены в табл. 4.

Таблица 4

Вариант ТКК	Условная единица стоимости на единицу полезной массы
I	0,85
II	0,78
III	0,93
IV	0,98

Минимальная величина максимальных затрат (минимакс) из всех вариантов ТКК составит 0,78 условных единиц при втором варианте проекта использования ТКК.

Этот вариант и может быть рекомендован для дальнейшей проработки как наилучший в предположении, что «природа», следуя широко известному «закону бутерброда», «выберет» наихудшую для человека ситуацию.

Примечание. Если бы в матрице выигрышей вместо приведенных затрат в качестве критерия эффективности фигурировал другой критерий, требующий отбора оптимального варианта по правилу максимизации (например, прибыли), то при выборе наилучшего решения следовало бы руководствоваться принципом максимина.

В отличие от сознательно противодействующего партнера «природа» не отстаивает собственных интересов и не ставит себе целью максимизировать выигрыш или минимизировать проигрыш. Вследствие этого минимаксная или максиминная стратегии при экономическом обосновании вариантов решений, в процессе проектирования сложной системы представляются слишком осторожными, пессимистическими и могут быть заменены другими принципами.

Список литературы

1. Нарусбаев, А. А. Введение в теорию обоснования проектных решений / А. А. Нарусбаев. – Л. : Судостроение, 1975.

УДК 519.7

Дедков, В. К.

Выбор варианта проектируемой системы при неопределенности условий ее применения / В. К. Дедков // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 2. – С. 10–14.

Дедков Виталий Кириллович
доктор технических наук, профессор,
научный сотрудник отдела безопасности
и нелинейного анализа,
Учреждение Российской академии наук,
Вычислительный центр
им. А. А. Дородницына РАН
119333, г. Москва, ул. Вавилова, 40.
8-495-135-61-95
E-mail: dedkov-33@rambler.ru

V. Dedkov
doctor of technical science, professor, the scientific
worker of the division of safety and nonlinear analysis
the establishment of the Russian academy of sciences
computer center A. A. Dorodnitsyn,
Russian academy of sciences
119333, Moscaw, Vavilova street, 40.
8-495-135-61-95
E-mail: dedkov-33@rambler.ru

Аннотация. Оптимизация решений в условиях неопределенности базируется на использовании принципов математического аппарата теории игр. В статье рассматриваются вопросы применения методов «минимакса» и «максимина» при выборе варианта проектируемой системы.

Ключевые слова: проектируемая система, условия неопределенности, оптимизация, критерии функциональной эффективности, показатели функциональной эффективности.

Abstract. Optimization of decisions in the conditions of uncertainty is based on use of the principles of mathematical apparatus of the theory of games. In article questions of application of methods of «minimax» and «maximine» are considered at a choice of option of designed system.

Key words: designed system, uncertainty conditions, optimization, criteria of functional efficiency, indicators of functional efficiency.

УДК 621.311:682.039

ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Н. К. Юрков

Введение

Во многих приложениях под термином системная безопасность понимается безопасность серверов, на которых хранится некая информация. Здесь под термином «системная безопасность» мы понимаем безопасность сложных систем произвольной сущности происхождения, в том числе и вычислительных, но далеко не только их.

Термин «теория катастроф», введенный Р. Томом для обозначения теории особенностей, теории бифуркаций и их приложений, связан с приложениями, в которых плавное изменение параметров способно привести к резкому, скачкообразному изменению состояния или режима движения системы.

Идентификация систем в теории управления – это определение структуры системы и ее параметров путем анализа входных и выходных данных системы. В то же время идентификация в промышленной безопасности – установление тождественности опасных производственных объектов.

В самом широком смысле под идентификацией предлагается понимать выработку точного языка описания реальности и соответствующих понятий и категорий, т.е. понятий крайне высокого, насколько это возможно, уровня. Сложность понятий – цена за простоту языка описания реальности, ее «законов» [1].

В каждый конкретный исторический период могут быть недостаточными ресурсы для получения с заданной точностью необходимого для решения практической проблемы описания реальности. Возникает необходимость использования присущих только человеку способностей в процессе управления. Более того, любая система либо непосредственно в явном виде содержит человеческий фактор, либо является элементом системы, которая содержит человеческий фактор. Так что любая эффективная методология идентификации должна включать процесс человеческого выбора, так как именно в результате него вырабатывается текущее управление процессом идентификации.

Системный анализ безопасности ограничивается выявлением факторов и обстоятельств, влияющих на появление аварий, катастроф, чрезвычайных ситуаций, других нештатных ситуаций, а также разработкой предупредительных мероприятий, снижающих вероятность их появления.

В задаче распознавания состояния безопасности сложных технических систем (СТС) наиболее точное решение может быть получено, если оно принимается на основе достаточного количества исходных данных. В большинстве практических задач все многообразие состояний СТС может быть сведено к нескольким классам, число которых невелико ввиду ограниченного набора действий, принимаемых в том или другом состоянии. В простейшем случае речь идет о двух состояниях СТС (опасное или не опасное, устойчивое или не устойчивое и т.д.). В подобных задачах проводится измерение каких-либо физических параметров, характеризующих состояние СТС, и классификация состояний СТС осуществляется по полученным значениям.

Рассмотрим информационные критерии эффективности и необходимости контроля для достижения требуемого уровня безопасности. До проведения операции контроля неопределенность состояния объекта контроля характеризуется априорной безусловной энтропией $H(\omega)$, где ω – состояние объекта контроля. После проведения операции контроля путем измерения значений одного или нескольких параметров x неопределенность состояния будет характеризоваться усредненной величиной – полной условной энтропией $\overline{H}(\omega|x)$. Разность этих величин

$$I = H(\omega) - \overline{H}(\omega|x) \qquad (1)$$

представляет собой количество информации, полученной в результате операции контроля, и может характеризовать качество метода или системы контроля. Здесь

$$H(\omega) = -\sum_{i=1}^{k} P(\omega_i)\log_n P(\omega_i), \tag{2}$$

где $P(\omega_i)$ – априорные вероятности состояний; k – число состояний; n – основание логарифма $(n = 2)$. Однако значение этой величины зависит от априорных вероятностей состояния объекта и основания логарифма при ее вычислении. Поэтому более предпочтительной является относительная величина – информационная эффективность

$$Э = \frac{H(\omega) - \overline{H}(\omega | x)}{H(\omega)}. \tag{3}$$

Она характеризует информационную эффективность параметров контроля и СТС в целом безотносительно к основанию логарифма. Значение величины Э изменяется в пределах от 0 до 1.

В случае двух состояний (устойчивое и неустойчивое) энтропия вычисляется по формуле

$$H(\omega_H) = -P(\omega_H)\log P(\omega_H) - P(\omega_y)\log P(\omega_y). \tag{4}$$

Полная условная энтропия $\overline{H(\omega | x)}$ определяется как

$$\overline{H(\omega | x) = \int_x p(x) H(\omega | x) =}$$

$$= -\int_x \{P(\omega_y)p(x|\omega_y)\log_2 \frac{P(\omega_y)p(x|\omega_y)}{p(x)} + P(\omega_H)p(x|\omega_H)\log_2 \frac{P(\omega_H)p(x|\omega_H)}{p(x)}\}dx. \tag{5}$$

Здесь $P(\omega_i)$ – априорные вероятности состояний ω_i; $P(x|\omega_i)$ – условные вероятности параметра контроля (одного или нескольких) в состоянии ω_i; $p(x)$ – плотность вероятности параметра (параметров) контроля x:

$$p(x) = \sum P(\omega_i)p(x|\omega_i); \tag{6}$$

$H(\omega | x)$ – частная условная энтропия:

$$H(\omega | x) = -\sum P(\omega_i | x)\log_2 P(\omega_i | x), \tag{7}$$

где апостериорные вероятности $P(x|\omega_i)$ вычисляются по формуле Байеса

$$P(\omega_i | x) = \frac{P(\omega_i)p(x|\omega_i)}{p(x)}. \tag{8}$$

Свойства СТС характеризуются необходимостью контроля, которая оценивается относительным недостатком информации, требуемой для надежного принятия решений. Показатель необходимости контроля

$$N = \frac{H(\omega)}{H(\omega)} - H_Д, \tag{9}$$

где $H_Д$ – допустимое значение энтропии, вычисляемое через допустимые вероятности состояний. Значения N изменяются в пределах от $-\infty$ до 1. Положительные значения свидетельствуют о необходимости контроля, отрицательные – о его необязательности.

В случае двух состояний объекта (ω_y и ω_H) допустимая вероятность неустойчивого состояния может быть принята равной $P_Д(\omega_H)$ = 0,00135 из условия граничного значения, равного

трем среднеквадратическим отклонениям. В этом случае $H_Д$ = 0,0148 бит при измерении энтропии в двоичных единицах информации. Для соответствия выбранных параметров контроля требованиям, которые обусловлены объектом, следует выполнять условие

$$Э > N. \quad (10)$$

Расчет информационной эффективности, а также дальнейшие вычисления при определении состояния объекта с использованием критерия Байеса предусматривают использование условных плотностей вероятности параметров контроля, соответствующих различным состояниям объекта. Очень часто при построении условных плотностей вероятности используется нормальный закон распределения, что позволяет значительно упростить вычисления [2]. Параметр порядка называется информатором и после установления порядка информация сокращается, поэтому следует за признак безопасности принять минимум информации, циркулирующей в системе, так как по количеству информации можно судить о безопасности – даже информационный градиент позволяет судить о приближающейся катастрофе.

Согласно предложенному в [1] информационному критерию безопасности, безопасность достигает своего максимума только в том случае, когда все выполняемые элементарные операции (атомы), из которых состоит процесс как субъект безопасности, имеют минимальную вероятность сбоя, другими словами, находятся под постоянным контролем, что задается выбранной частотой контрольных операций.

Переход на катастрофический сценарий развития ситуации сродни бифуркациям (особенности или катастрофы), т.е. происходит переход количества в качество, переход в другой аттрактор, имеющий катастрофически низкий потенциальный (организационный, энергетический, информационный, затратный) уровень, в который скатывается высокоорганизованная система с поразительной скоростью. Идти вниз легче, чем подниматься в гору.

Таким образом, на концептуальном уровне необходимо предусмотреть меры, разрушающие рекуррентный алгоритм управления (построения) СТС (и не только технических, но и произвольных сложных систем).

На техническом уровне нельзя оценивать безопасность, как во многих современных приложениях, по временным характеристикам (например, по величине дисперсии промежутков между регламентными осмотрами и ремонтами), так как они (осмотры и ремонты) не обеспечивают отсутствие сбоев (в том числе и катастрофических) в работе системы. Так, в теории гарантированного управления эксплуатацией это положение вполне доказывается.

Если аттрактор рассматривать как устойчивое состояние системы, переход на которое сопровождается всплеском (резким увеличением) количества информации, а катастрофа – это самый нижний энергетический уровень (энтропийный) согласно законам термодинамики, при переходе на который не только не тратится, но даже выделяется большое количество энергии (той энергии, которая была затрачена на организацию среды существования СТС), то для обеспечения безопасности следует предотвратить бифуркацию как переход сложно организованной системы в новый аттрактор под воздействием случайного скачка. Для этого на концептуальном уровне следует установить буфер, способный вернуть систему в сбалансированное состояние, но этот буфер должен обладать другой (отличной) физической структурой, не должен описываться рекуррентной моделью, должен в момент времени появления внешнего толчка (внешней накачки, если сравнивать с лазерным излучением) поднять «энергетический» барьер, с тем, чтобы не допустить «туннельного перехода» системы из стабильного в катастрофическое состояние [3].

Только находясь под постоянным контролем, только погрузившись в облако электронных средств контроля, вездесущего и непобедимого, на подобии распространения на нашей планете плесени, которая за счет своего многообразия и всепроникновения непобедима, можно надеяться на обеспечение системной безопасности.

Современные электронные технологии позволяют приступить к осуществлению такой утопической мысли, каковой является мечта о безопасном мире. Используя «облачную терминологию», можно представить систему обеспечения глобальной безопасности так, как это сделано на рис. 1.

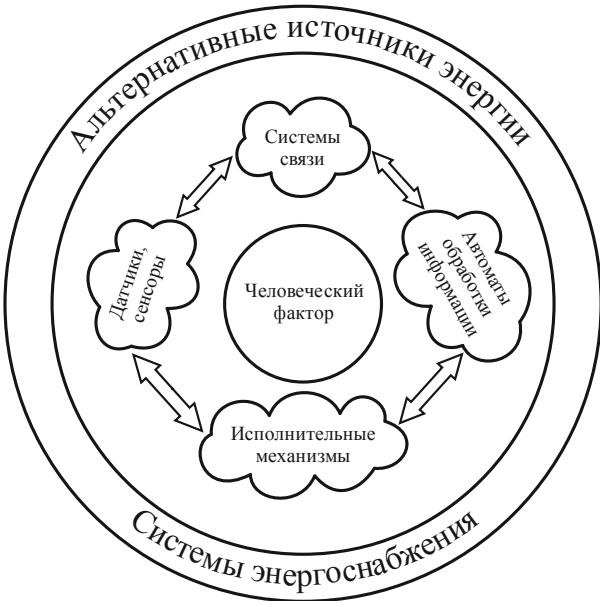


Рис. 1. Глобализация систем безопасности

Здесь всепроникающие источники энергии (в том числе и альтернативные) обеспечивают бесперебойное снабжение энергией. В центре системы (под неусыпной охраной) находится человеческий фактор как главный источник опасности, для защиты от которого подразумевается создание глобальных (мировых, всепроникающих) систем связи, сбора информации (содержат датчики, сенсоры), систем автоматической обработки информации, а также исполнительные механизмы.

Как нам видится ближайшее будущее, за счет глобализации развития электроники, в том числе и печатной, произойдет новый взрыв коммерческих применений электроники, расширяющий достигнутые границы контроля за ситуацией.

Автоматы обработки информации примут на себя основную нагрузку по выявлению потенциально опасных ситуаций и выработают управляющие воздействия на исполнительные механизмы.

Рассмотрим основные источники угроз. Как это не печально, но основным источником техногенных катастроф, по-прежнему, остается человеческий фактор. Конечно, непредсказуемый цунами может наделать великих бед, но, по сравнению с числовыми характеристиками катастроф, как это не кощунственно выглядит, природа занимает далеко не первое место в списке «организаторов» катастроф. По-прежнему, человек со своими слабостями порождает подавляющее большинство техногенных аварий, уносящих множество человеческих жизней и приносящих колоссальные убытки. В связи с этим позвольте сделать вывод о том, что главная цель глобальной безопасности – это устранение человеческого фактора из систем управления множественными катастрофосодержащими процессами.

Несмотря на это, не следует забывать, что основными процессами (элементами нештатных ситуаций, приводящих к катастрофам), контроль которых обеспечит системную безопасность, являются: болезнетворные микроорганизмы, химические вещества, газовые выделения, усталостные явления в материалах, алогичное поведение человека (психологические отклонения), климатические изменения, болезнь человека (физиологические изменения), симптомы старения, изменения в магнитных, гравитационных, электрических и других полях и т.д.

При решении задач обеспечения безопасности СТС риск от тяжелых аварий анализировался с нескольких точек зрения, таких как медико-биологические, экономико-экологические и глобально-социальные факторы с использованием понятия «приемлемый риск». Риск от тяжелых аварий определялся в виде [4] $R(P,C)=\sum_{i=1}^{k} P_i C_i$, где $A=(A_1, A_2, \ldots, A_k)$ – перечень событий, соответствующих тяжелым авариям; $P=(P_1, P_2, \ldots, P_k)$ и $C=(C_1, C_2, \ldots, C_k)$ – соответственно ве-

роятности и последствия указанных аварий; $R(P, C)$ должно стремиться к минимуму; естественно $R_{\min}(P, C) = R_0 \neq 0$ (R_0 – допустимый или приемлемый риск; $R > R_0$ определяет класс недопустимого риска).

Выбор приемлемого риска производился для общего случая, когда функции $P = P(q_1, q_2, \ldots, q_n, t)$, $C = C(c_1, c_2, \ldots, c_m, t)$ являлись неизвестными.

При составлении математической модели СТС, выборе и обосновании типа случайного процесса, адекватно описывающего его состояние, использовались марковские цепи, диффузионные процессы, ветвящиеся процессы, случайные процессы со стационарными приращениями и т.д. Для марковских процессов, задавая переходные вероятности с использованием уравнений Колмогорова–Смолуховского–Чепмена, получались нелинейные дифференциальные уравнения в частных производных относительно плотности распределения вероятностей для непрерывных случайных процессов или распределение для дискретных случайных величин. Последствие аварий отображает физико-химические изменения в окружающей среде и, как правило, находится из решений уравнений математической физики. На основе описания объекта и экологических последствий аварий получается операторное нелинейное уравнение

$$L(C, P) = R, \tag{12}$$

совпадающее по форме с уравнением теории упругости (R – внешняя нагрузка).

В рассматриваемом случае оно представимо в виде двух операторных уравнений

$$L_1(R, P, C) = P, \; L_2(R, P, C) = C. \tag{13}$$

При введении вектор-функции $X = (P, C)$ и нелинейного оператора A первое из них представится в виде операторного уравнения

$$A(R, X) = X. \tag{14}$$

Так как физико-химические изменения в окружающей среде должны соответствовать экологическим нормам, а вероятность возникновения аварий должна быть близка к нулю, то последнее уравнение имеет решение $X = 0$ при всех значениях риска R. При некоторых значениях R может иметь ненулевые решения, соответствующие скачкообразным изменениям (катастрофам) в экологической обстановке окружающей среды и изменению значений вероятностей аварий. Риск $R_{кр}$ назовем критическим, если при некоторых значениях R, близких к $R_{кр}$, это уравнение имеет малые ненулевые решения ($R_{кр}$ – точка бифуркации оператора $A(R, X)$). Таким образом, анализ безопасности СТС сводится к чисто математической задаче определения точек бифуркации $A(R, X)$, например, на основе линеаризации нелинейного оператора (отыскание точек бифуркации сводится к определению характеристических значений соответствующего линейного оператора). Каждое нечетно-кратное (в частности, простое характеристическое значение линейного оператора) является точкой бифуркации нелинейного оператора $A(R, X)$. Если характеристическое значение линейного оператора имеет четную кратность, то требуется дополнительный анализ, который сводится к конструированию так называемого поля вращения и доказательству его невырожденности. Определение точек бифуркации нелинейного оператора значительно сложнее. Упрощения возможны при известных функции последствиях аварий или вероятности распределения. Функция последствий аварий определяется в результате расчета технического состояния среды при чрезвычайной ситуации и необходимого времени ликвидации последствий аварий. При известном распределении вероятностей (или плотности распределения), построив случайный процесс, можно определить вероятности изменения состояния СТС во времени. Определяется значение критического риска $R_{кр}$, а далее – значение критического риска, для которого вероятность скачкообразного изменения технической обстановки (катастрофа) наибольшая. При этом наибольшая вероятность потери ее устойчивости (катастрофа) наступает при $R_{кр}$.

Отследить риски, контролировать изменения в вышеперечисленных процессах поистине невозможно на данном этапе развития техники. Но в настоящее время глобальный прорыв в решении этой проблемы видится в развитии так называемой органической и печатной электроники.

Прежде всего название «органическая и печатная электроника» вовсе не означает, что все используемые материалы являются органическими и наносятся они исключительно методами печати. На наш взгляд, достаточно удачны определения органической и печатной электроники, приведенные в википедии. Согласно им, печатная электроника – «совокупность печатных методов, используемых для создания электронных приборов». А органическая, или пластиковая, или полимерная электроника – «направление в электронике, основанное на применении проводящих полимеров, пластиков, органических соединений с низкой молекулярной массой (small molecular)» [5].

Таким образом, слова «органическая» и «печатная» характеризуют одно и то же направление в электронике, но по разным признакам: первое отражает преимущественный состав используемых материалов, а второе – преимущественную технологию нанесения материалов в процессе производства устройств. Основные преимущества органической электроники в сравнении с традиционной заключаются в меньшей стоимости изготовления устройств, их гибкости, применении более простых технологий изготовления, а также возможности изготовления изделий большой площади, что особенно актуально для экранов и систем освещения [2]. Вместе с тем на настоящем этапе развития органической электроники она не лишена ряда недостатков: низкого разрешения при печати (>5 мкм), низкой степени интеграции, низкой подвижности носителей заряда, ограничивающей диапазон рабочих частот. Так, при подвижности носителя заряда 0,5 $см^2/(В·с)$ максимальная рабочая частота составит 100 кГц.

Как правило, в органической электронике используются гибкие полимерные основания. Однако их использование создает ряд проблем. Гибкие основания обычно не полностью стабильны по размерам, что может существенно сказаться на разрешении и совмещении при печати рисунка. Кроме того, при воздействии высоких температур гибкие основания могут расплавиться, что ограничивает технологические возможности при производстве изделий органической электроники. В качестве гибких оснований в органической электронике наиболее широко применяются такие полиэфиры, как полиэтилентерефталат и полиэтиленнафталат; также могут использоваться полиимид, полипропилен, полилактид, циклоолефиновый сополимер, бумага и другие материалы.

Проводники необходимы практически во всех изделиях органической электроники. К проводникам предъявляется ряд требований, включающих низкое сопротивление, гладкость поверхности, химическую стойкость. Выделяют три группы материалов, используемых в органической электронике в качестве проводников: материалы на основе металлов; органические соединения; оксиды металлов.

Органические полупроводники используются в различных активных устройствах, причем многие из них могут быть нанесены из раствора, в том числе методами печати. В органической электронике в качестве полупроводников могут применяться следующие группы материалов: полимеры, например, политиофен; олигомеры, например, олиготиофены; органические соединения с низкой молекулярной массой, например, пентацен и его производные; углеродные нанотрубки; «гибридные» (органо-неорганические) материалы. Мобильность носителей заряда в органических полупроводниках сравнима с аморфным кремнием, но пока значительно ниже, чем в поликристаллическом кремнии. Ожидается, что в ближайшие несколько лет мобильность носителей заряда достигнет уровня поликристаллического кремния: сначала в лабораторных условиях, а потом и в серийно выпускаемых устройствах. Это станет возможным благодаря оптимизации органических соединений с низкой молекулярной массой и полимеров или использованию новых материалов, таких как углеродные нанотрубки или гибридные материалы. Большинство используемых сейчас органических полупроводников, в частности, пентацен и политиофен, относятся к полупроводникам *p*-типа, но полупроводники *n*-типа становятся более распространенными. Наличие полупроводников *p*- и *n*-типа позволяет реализовывать структуры типа КМОП, обладающие существенными преимуществами, в том числе меньшим энергопотреблением. Для производства изделий органической электроники может быть использована глубокая, флексографская, офсетная, трафаретная и струйная технологии печати, а также лазерная абляция.

На сегодняшний день очень успешно серийно выпускаются билеты, идентификационные карточки, солнечные батареи и другие изделия органической и печатной электроники. Конечно, по многим техническим характеристикам эти изделия уступают кремниевым аналогам: КПД солнечных батарей ниже, а объемы органической памяти и частота органического процессора несоизмеримо меньше. Тем не менее уникальные преимущества органической и печатной электрони-

ки, заключающиеся в низкой стоимости массового производства, гибкости и возможности изготовления изделий большой площади, а также высокие темпы совершенствования изделий открывают перед ней широкую область применения, ведь далеко не во всех устройствах нужны гигабайты памяти и гигагерцы частот. В самое последнее время появилась информация о создании в нашей стране дистанционных обнаружителей взрывчатых веществ, определении неадекватного поведения человека и др. Все это ведет к глобализации контроля, расширению его функций, добавляя в которые функции пресечения развития катастроф, мы получим «безопасное» существование человечества.

Таким образом, расширяя сферу применений электроники (в том числе и печатной) возможно достичь глобального контроля за ситуацией, ведь все катаклизмы предваряются какими-то ни было изменениями физических сред, зафиксировать, распознать и правильно интерпретировать которые и есть задача современной электроники.

Список литературы

1. Юрков, Н. К. Модели и алгоритмы управления интегрированными производственными комплексами : моногр. / Н. К. Юрков. – Пенза : Информационно-издательский центр ПГУ, 2003. – 198 с.
2. Юрков, Н. К. К проблеме обеспечения безопасности сложных систем / Н. К. Юрков // Надежность и качество – 2011 : тр. междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2011. – Т. 1. – С. 104–106.
3. Тюрина, Л. А. Системная организация жизненного цикла промышленных изделий / Л. А. Тюрина, Н. К. Юрков // Тяжелое машиностроение. – 2006. – № 6. – С. 8–12.
4. Данилов, А. М. Системные методологии, идентификация систем и теория управления: промышленные и аэрокосмические приложения / А. М. Данилов, И. А. Гарькина, Э. В. Лапшин, Н. К. Юрков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 1. – С. 3–11.
5. Нисан, А. Органическая и печатная электроника – новая ветвь развития / А. Нисан // Поверхностный монтаж : инф. бюллетень ЗАО Предприятия ОСТЕК. – 2011. – № 4 (90). – С. 14–19.

УДК 621.311:682.039

Юрков, Н. К.

Оценка безопасности сложных технических систем / Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 2. – С. 15–21.

Юрков Николай Кондратьевич
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет,
440026, г. Пенза, ул. Красная, 40.
(841-2) 56-43-46
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Аннотация. Проводится анализ проблем обеспечения тотального контроля нештатных ситуаций, возникающий на начальных стадиях угроз безопасности. На базе информационного критерия безопасности предложено оценивать глобальный максимум по максимуму полезной информации. Показано, что приближение к локальному максимуму системной безопасности возможно лишь при глобализации систем контроля нештатных ситуаций, что может быть достигнуто даже при современном уровне развития электронной техники.

Ключевые слова: безопасность, сложная система, критерий безопасности, нештатные ситуации.

N. Yurkov
doctor of technical science, professor, the managing
of department construction and the production of radio equipment
Penza state university
440026, Penza, Red street, 40.
(841-2) 56-43-46
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Abstract. Analyzes the problems of providing total control of emergency situations arising in the early stages of security threats. Based on the information criterion to assess the global security offered up to the maximum of useful information. It is shown that the approach to the local maximum system security is possible only if the globalization of control systems of emergency situations that can be achieved even at the present level of development of electronic technology.

Key words: security, complex system, the criterion of security, emergency situations.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

УДК 681:519.6

К ПРОБЛЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

А. И. Фесечко

Решение задачи динамики вращающихся твердых тел с полостями, содержащими жидкость, относящейся к числу трудных задач классической механики, остается в наше время наиболее приоритетной. Это связано с развитием ракетной и космической техники, широкой программой исследования космического пространства при изучении динамики космических аппаратов с запасами жидкого топлива. Рассматриваемые в статье вопросы могут найти свое применение при проектировании быстровращающихся роторов, гироскопов, центрифуг, имеющих внутри себя полости, заполненные жидкостью.

Сведение интегрального уравнения к системе дифференциальных уравнений

В статье при решении задачи управления динамической системой, представляющей собой твердое тело с полостью, содержащей идеальную жидкость, используется выражение для $\vec{\Omega}(t)$ как функции управляющего момента $\vec{M}(t)$, с помощью которого можно изменять состояние динамической системы, переводя ее из одного состояния в другое.

Рассмотрим выражение для угловой скорости, полученное в [1, 2]:

$$\vec{\Omega}(t) = \int_0^t \vec{M}(\tau)(Xe^{p^{(1)}(t-\tau)} + Ye^{p^{(2)}(t-\tau)})d\tau. \tag{1}$$

Для решения различных задач оптимального управления необходимо применить хорошо развитый аппарат Гамильтона–Понтрягина [3, 4]. С этой целью интегральное соотношение (1) необходимо преобразовать к системе дифференциальных уравнений. Введем комплексные $\Omega = \Omega_x - i\Omega_y$, $M = M_x - iM_y$, записывая выражение для Ω_x и Ω_y в виде

$$\begin{aligned}\Omega_x(t) = &\int_0^T M_x(\tau)(X\cos(\eta^{(1)}(t-\tau)) + Y\cos(\eta^{(2)}(t-\tau)))d\tau + \\ &+\int_0^T M_y(\tau)(X\sin(\eta^{(1)}(t-\tau)) + Y\sin(\eta^{(2)}(t-\tau)))d\tau;\end{aligned} \tag{2}$$

$$\Omega_y(t)=\int_0^T -M_x(\tau)(X\sin(\eta^{(1)}(t-\tau))+Y\sin(\eta^{(2)}(t-\tau)))d\tau+$$
$$+\int_0^T M_y(\tau)(X\cos(\eta^{(1)}(t-\tau))+Y\cos(\eta^{(2)}(t-\tau)))d\tau. \qquad (3)$$

Введем обозначения:

$$A(t)=\int_0^t\left[M_x(\tau)X\cos(\eta^{(1)}(t-\tau))+M_y(\tau)X\sin(\eta^{(1)}(t-\tau))\right]d\tau,$$
$$B(t)=\int_0^t\left[M_x(\tau)X\cos(\eta^{(2)}(t-\tau))+M_y(\tau)X\sin(\eta^{(2)}(t-\tau))\right]d\tau,$$
$$C(t)=\int_0^t\left[-M_x(\tau)X\sin(\eta^{(1)}(t-\tau))+M_y(\tau)X\sin(\eta^{(1)}(t-\tau))\right]d\tau,$$
$$D(t)=\int_0^t\left[-M_x(\tau)X\sin(\eta^{(1)}(t-\tau))+M_y(\tau)X\sin(\eta^{(1)}(t-\tau))\right]d\tau.$$

Тогда $\Omega_x(t)=A(t)+B(t)$, и $\Omega_y(t)=C(t)+D(t)$. Для выражения (1) можно записать следующую эквивалентную ему систему:

$$\dot{\vec{x}}(t)=\begin{cases}\dot\Omega_x(t)=M_x(t)(X+Y)+\eta^{(1)}C(t)+\eta^{(2)}D(t),\\ \dot\Omega_y(t)=M_y(t)(X+Y)+\eta^{(1)}A(t)+\eta^{(2)}B(t),\\ \dot A(t)=M_x(t)X+\eta^{(1)}C(t),\\ \dot B(t)=M_x(t)X+\eta^{(2)}C(t),\\ \dot C(t)=M_y(t)X+\eta^{(1)}C(t),\\ \dot D(t)=M_y(t)X+\eta^{(2)}C(t).\end{cases}\qquad \vec{x}(0)=\begin{cases}\Omega_x(0)=0,\\ \Omega_y(0)=0,\\ A(0)=0,\\ B(0)=0,\\ C(0)=0,\\ D(0)=0;\end{cases} \qquad (4)$$

Введем следующие обозначения $(n=6, m=2)$:

$$A_{nxn}=\begin{pmatrix}0&0&0&0&\eta^{(1)}&\eta^{(2)}\\0&0&-\eta^{(1)}&-\eta^{(2)}&0&0\\0&0&0&0&\eta^{(1)}&0\\0&0&0&0&0&\eta^{(2)}\\0&0&-\eta^{(1)}&0&0&0\\0&0&0&-\eta^{(2)}&0&0\end{pmatrix};\quad A_{nxn}=\begin{pmatrix}0&0&0&0&\eta^{(1)}&\eta^{(2)}\\0&0&-\eta^{(1)}&-\eta^{(2)}&0&0\\0&0&0&0&\eta^{(1)}&0\\0&0&0&0&0&\eta^{(2)}\\0&0&-\eta^{(1)}&0&0&0\\0&0&0&-\eta^{(2)}&0&0\end{pmatrix};$$

$$B_{nxm}=\begin{pmatrix}X+Y&0\\0&X+Y\\X&0\\Y&0\\0&X\\0&Y\end{pmatrix}\quad x_{0_{nx1}}=\begin{pmatrix}0\\0\\0\\0\\0\\0\end{pmatrix}. \qquad (5)$$

С учетом (5) систему (4) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} &\dot{\vec{x}}(t) = A\vec{x}(t) + B\vec{M}(t), \\ &\vec{x}(t_0) = x_0. \end{aligned} \tag{6}$$

В итоге имеем систему из шести уравнений.

Задача безусловной минимизации с терминальным функционалом

Рассмотрим задачу оптимального управления без ограничений на управляющий момент. Здесь вводится классический квадратичный терминальный функционал с квадратичной штрафной функцией.

Задача оптимального управления системой (6) имеет вид

$$J(M) = (\Omega_x(T) - \Omega_1^0)^2 + (\Omega_y(T) - \Omega_2^0)^2 + \gamma\int_0^T (M_x^2(t) + M_y^2(t))dt \to \min$$

или в векторном виде

$$j(M) = \left\| Z\vec{x}(T; M) - b \right\|_{E^n}^2 + \gamma\int_0^T \left\| \vec{M}(t) \right\|_{E^m}^2 dt \to \min, \tag{7}$$

где $\vec{M}(t) = (M_x(t), M_y(t))^T$ – неизвестная функция управления, γ – заданное действительное положительное число, $Z = \left\| z_{i,j} \right\|_{6\times 6}$ – матрица 6×6, причем отличны от нуля только $z_{1,1} = z_{2,2}$, $b = (\Omega_1^0, \Omega_1^0, 0, 0, 0, 0)^T$ – столбец, Ω_i^0, $i = 1,2$ – заданные действительные числа.

Будем решать задачу (7) с использованием принципа максимума Л. Д. Понтрягина. Функция Гамильтона–Понтрягина имеет вид

$$H = \gamma \left\| \vec{M}(t) \right\|^2 + \left\langle A\vec{x}(t) + B\vec{M}(t), \psi(t) \right\rangle. \tag{8}$$

Сопряженная система

$$\begin{cases} \dot{\psi}(t) = -H_x' = -A^T\psi(t), \\ \psi(T) = \Phi'(x(T; \vec{M})) = 2Z \cdot (Zx(T, \vec{M}) - b). \end{cases} \tag{9}$$

Получим выражения для оптимального управления

$$\begin{aligned} &H_{M_x}' = 2\gamma M_x + (X + Y)\psi_1 + X\psi_3 + Y\psi_4, \\ &M_x^* = -\frac{(X + Y)\psi_1 + X\psi_3 + Y\psi}{2\gamma}, \end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned} &H_{M_y}' = 2\gamma M_y + (X + Y)\psi_2 + X\psi_5 + Y\psi_6, \\ &M_y^* = -\frac{(X + Y)\psi_2 + X\psi_5 + Y\psi_6}{2\gamma}. \end{aligned} \tag{11}$$

Для определения оптимального управления разрешим сопряженную систему (9). Из вида матрицы A^T можем сразу выписать выражения для первых двух компонент $\psi(t)$

$$\begin{aligned} &\psi_1(t) = 2(\Omega_x(T) - \Omega_1^0), \\ &\psi_2(t) = 2(\Omega_y(T) - \Omega_2^0). \end{aligned}$$

Оставшиеся компоненты найдем, решив следующую систему:

$$\begin{aligned}
\psi_3(t) &= 2\eta^{(1)}(\Omega_y(T) - \Omega_2^0) + \eta^{(1)}\psi_5(t),\\
\psi_4(t) &= 2\eta^{(2)}(\Omega_y(T) - \Omega_2^0) + \eta^{(2)}\psi_6(t),\\
\psi_5(t) &= -2\eta^{(1)}(\Omega_x(T) - \Omega_1^0) - \eta^{(1)}\psi_3(t),\\
\psi_6(t) &= -2\eta^{(1)}(\Omega_x(T) - \Omega_1^0) - \eta^{(1)}\psi_4(t).
\end{aligned} \tag{12}$$

Уравнения 1 и 3, 2 и 4 системы (12) можно решить независимо. В итоге получим:

$$\begin{aligned}
\psi_3(t) &= 2(\Omega_y(T) - \Omega_2^0)(\cos((T-t)\eta^{(1)}) - 1) - 2(\Omega_x(T) - \Omega_1^0)\sin(\eta^{(1)}(T-t));\\
\psi_4(t) &= 2(\Omega_y(T) - \Omega_2^0)(\cos((T-t)\eta^{(2)}) - 1) - 2(\Omega_x(T) - \Omega_1^0)\sin(\eta^{(2)}(T-t));\\
\psi_5(t) &= 2(\Omega_x(T) - \Omega_1^0)(\cos(\eta^{(1)}(T-t)) - 1) + 2(\Omega_y(T) - \Omega_2^0)\sin(\eta^{(1)}(T-t));\\
\psi_6(t) &= 2(\Omega_x(T) - \Omega_1^0)(\cos(\eta^{(2)}(T-t)) - 1) + 2(\Omega_y(T) - \Omega_2^0)\sin(\eta^{(2)}(T-t)).
\end{aligned}$$

Полученные решения сопряженной системы нужно подставить в (10) и (11) и окончательно значения оптимального управления можно будет записать, определив параметры $\Omega_x(t)$ и $\Omega_y(t)$. Для этого можно воспользоваться системой двух линейных уравнений относительно $\Omega_x(t)$ и $\Omega_y(t)$, которая получается из (2) и (3) при $t = T$ подстановкой в нее выражений (10) и (11) и найденных решений сопряженной системы (9), а именно:

$$\begin{aligned}
\Omega_x(T) = &\int_0^T M_x^*(\tau)(X\cos(\eta^{(1)}(T-\tau)) + Y\cos(\eta^{(2)}(T-\tau)))d\tau +\\
&+\int_0^T M_y^*(\tau)(X\cos(\eta^{(1)}(T-\tau)) + Y\sin(\eta^{(2)}(T-\tau)))d\tau;
\end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned}
\Omega_y(T) = &\int_0^T M_x^*(\tau)(X\sin(\eta^{(1)}(T-\tau)) + Y\sin(\eta^{(2)}(T-\tau)))d\tau +\\
&+\int_0^T M_y^*(\tau)(X\cos(\eta^{(1)}(T-\tau)) + Y\sin(\eta^{(2)}(T-\tau)))d\tau.
\end{aligned} \tag{14}$$

Выражения (13) и (14) окончательно решают поставленную задачу в аналитической форме.

Такой подход делает возможным широкую постановку различных задач оптимального управления, определения оптимальных конструктивно-технологических параметров динамической системы, изучения устойчивости движения управляемого объекта.

Список литературы

1. Гурченков, А. А. Момент сил внутреннего трения быстровращающегося цилиндрического сосуда, заполненного вязкой жидкостью / А. А. Гурченков // Известия вузов. Приборостроение. – 2001. – Т. 44, № 2. – С. 44–49.
2. Гурченков, А. А. Вихревые движения жидкости в полости вращающегося тела / А. А. Гурченков. – М. : Народный учитель, 2001. – 176 с.
3. Беллман, Р. Прикладные задачи динамического программирования / Р. Беллман, С. Дрейфус. – М. : Наука, 1965. – 460 с.
4. Беллман, Р. Некоторые вопросы математической теории управления / Р. Беллман, И. Гликсберг, О. Гросс. – М. : ИЛ, 1962.

УДК УДК 681:519.6
Фесечко, А. И.
К проблеме управления динамической системой с распределенными параметрами / А. И. Фесечко // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 2. – С. 22–26.

Фесечко Анатолий Иванович
кандидат технических наук,
доцент, научный сотрудник,
отдел безопасности и нелинейного анализа,
Учреждение Российской академии наук
Вычислительный центр им. А. А. Дородницына РАН
119333, г. Москва, ул. Вавилова, 40.
E-mail: fesechko_anatoli@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются задачи управления динамической системой, представляющей собой твердое тело с полостью, содержащей идеальную жидкость.

Ключевые слова: управление системой, динамические системы, дифференциальные уравнения, терминальный функционал, идеальная жидкость, разрывные уравнения.

A. Fesechko
candidate of technical sciences, docent,
the scientific worker of the division of safety
and nonlinear analysis the establishment
of the Russian academy of sciences computer center
A. A. Dorodnitsyn Russian academy of sciences
119333, Moscaw, Vavilova street, 40.
E-mail: fesechko_anatoli@mail.ru

Abstract. This paper deals with the dynamic control system, which is a solid body with a cavity containing a perfect fluid.

Key words: management systems, dynamical systems, differential equations, terminal functionality, perfect fluid, explosive equation.

УДК 623.4.055

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ ФАБРИ–ПЕРО ПРИ НАКЛОННОМ ПАДЕНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ

А. Д. Пимкин

Рассмотрим случай дифракции плоской однородной электромагнитной волны на двумерно периодической структуре под произвольным углом падения. Для решения краевой задачи дифракции электромагнитных волн на неоднородных диэлектрических слоях интерференционного оптического фильтра используем автономный блок в виде прямоугольного параллелепипеда (рис. 1). Если относительная диэлектрическая проницаемость второго слоя ε_2 больше первого – ε_1, то V – область с высоким показателем преломления; $V_0 - V$ – область с низким показателем преломления. Если $\varepsilon_2 < \varepsilon_1$, то, наоборот, V – область с низким показателем преломления; $V_0 - V$ – область с высоким показателем преломления. Относительная магнитная проницаемость слоев принимается $\mu_1 = \mu_2 = 1$.

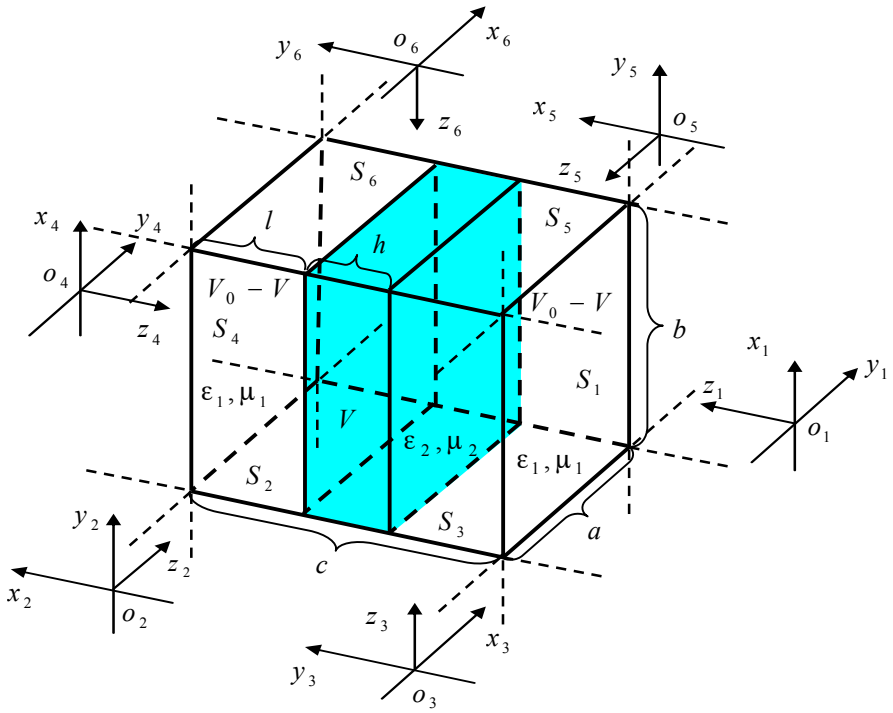


Рис. 1. Модель автономного блока

Для однородных диэлектрических слоев решается одномерная задача дифракции, для неоднородных слоев – трехмерная задача дифракции. На рис. 2,*а* показана декомпозиция неоднородных по толщине диэлектрических слоев на автономные блоки. Аппроксимация неоднородности по толщине диэлектрического слоя ступенчатая. Ступенчатая модель приближается к своему плавному прообразу по мере увеличения количества автономных блоков в плоскости входного сечения S_1 или S_2.

Решение задачи дифракции для оптического фильтра в целом ищется как рекомпозиция дескрипторов автономных блоков. Параметры оптического фильтра (коэффициенты отражения и пропускания) определяются из дескриптора фильтра. В результате рекомпозиции дескрипторов автономных блоков получаем матрицу проводимости оптического фильтра в базисе каналов Флоке автономных блоков (рис. 2,*б*). Эта матрица преобразуется по следующей методике.

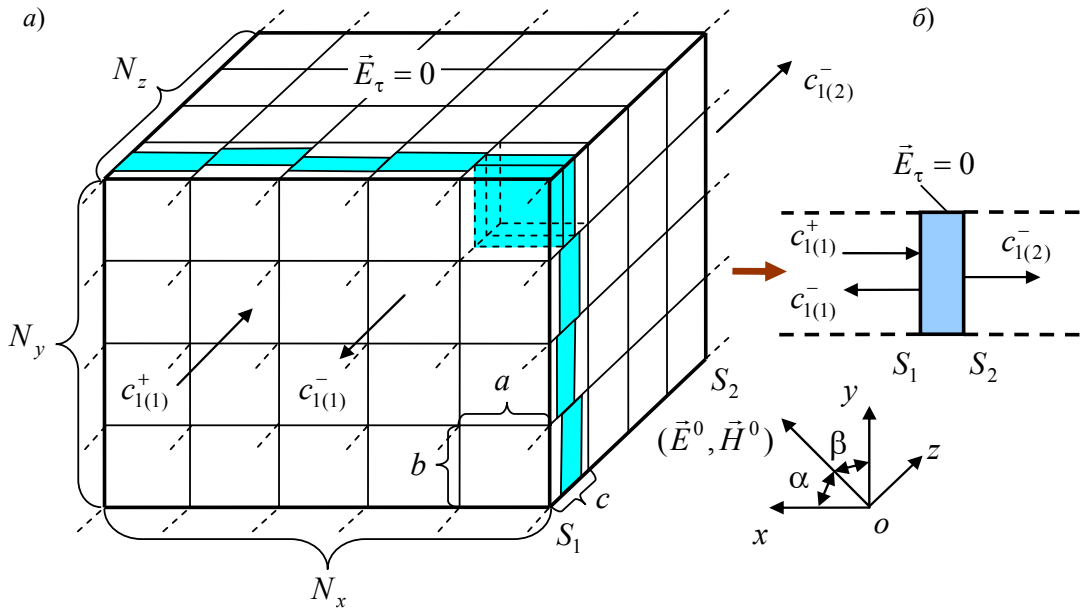


Рис. 2. Модель оптического фильтра с неоднородными диэлектрическими слоями:
а – декомпозиция на автономные блоки; *б* – рекомпозиционная модель – виртуальные каналы Флоке автономных блоков; $\left(\vec{E}^0, \vec{H}^0\right)$ – падающая ТЕМ-волна; $c^+_{1(1)}, c^-_{1(1)}, c^-_{1(2)}$ – амплитуды падающей, отраженной и прошедшей волн в каналах Флоке; $N_x \times N_y \times N_z$ – количество автономных блоков

Касательные составляющие электрических и магнитных полей на гранях «сшиваемых» параллелепипедов представлены рядами Фурье[1]:

$$\vec{E}_1 = \sum_{l=1}^{\infty} a_{l(1)} \vec{e}_{l(1)}, \vec{H}_1 = \sum_{l=1}^{\infty} b_{l(1)} \vec{h}_{l(1)} \text{ на } S_1; \tag{1}$$

$$\vec{E}_4 = \sum_{l=1}^{\infty} a_{l(4)} \vec{e}_{l(4)}, \vec{H}_4 = \sum_{l=1}^{\infty} b_{l(4)} \vec{h}_{l(4)} \text{ на } S_4. \tag{2}$$

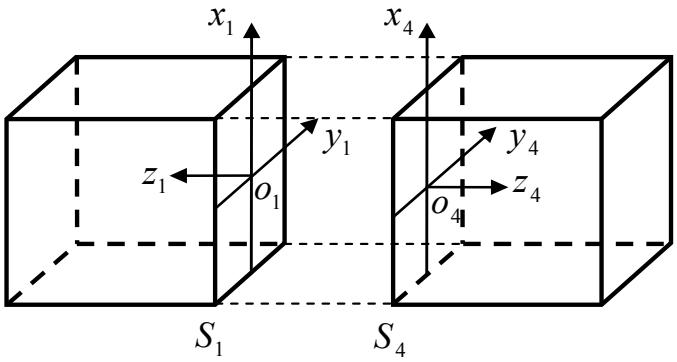


Рис. 3. Рекомпозиция автономных блоков в локальных системах координат на гранях параллелепипедов

Локальные системы координат на гранях S_1 и S_4 (рис. 3) отличаются лишь продольными координатами – они имеют противоположные направления. Положительное направление вектора Пойнтинга для собственных волн канала Флоке в системе координат грани S_1 является отрицательным в системе координат грани S_4:

$$\vec{e}_{l(1)} \times \vec{h}^*_{l(1)} = -\vec{e}_{l(4)} \times \vec{h}^*_{l(4)}, l = 1, 2, \ldots \tag{3}$$

Из выражения (3) следует [1]:

$$\vec{e}_{l(1)} = \vec{e}_{l(4)}, \vec{h}_{l(1)} = -\vec{h}_{l(4)}, l = 1, 2, ... \quad (4)$$

Условия непрерывности касательных составляющих электрического и магнитного полей $\vec{E}_1 = \vec{E}_4, \vec{H}_1 = \vec{H}_4$ на «сшиваемых» гранях S_1 и S_4, представленных рядами Фурье (1), (2), с учетом соотношений (4), сводятся к равенству коэффициентов:

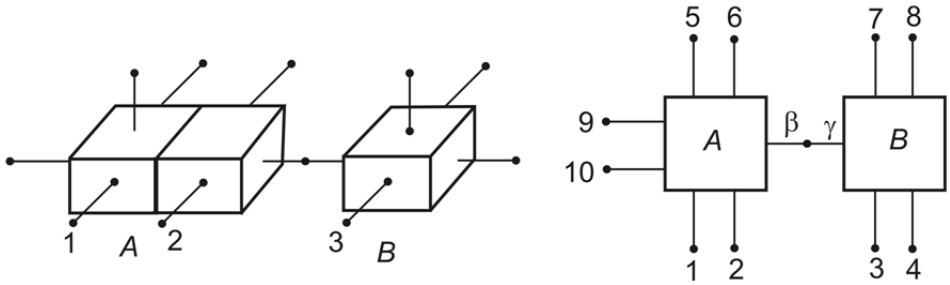
$$a_{l(1)} = a_{l(4)}, b_{l(1)} = -b_{l(4)}, l = 1, 2, ... \quad (5)$$

На «сшиваемых» гранях S_1 и S_4 касательные составляющие электромагнитного поля можно представить также и в виде суперпозиции составляющих прямых и обратных волн каналов Флоке:

$$\vec{E}_1 = \sum_{k=1}^{\infty} (c^+{}_{k(1)} + c^-{}_{k(1)}) \vec{e}_{k(1)}, \vec{H}_1 = \sum_{k=1}^{\infty} (c^+{}_{k(1)} - c^-{}_{k(1)}) \vec{h}_{k(1)}; \quad (6)$$

$$\vec{E}_4 = \sum_{k=1}^{\infty} (c^+{}_{k(4)} + c^-{}_{k(4)}) \vec{e}_{k(4)}, \vec{H}_4 = \sum_{k=1}^{\infty} (c^+{}_{k(4)} - c^-{}_{k(4)}) \vec{h}_{k(4)}. \quad (7)$$

На рис. 4 показан фрагмент рекомпозиции автономных блоков в виде прямоугольных параллелепипедов. Первый автономный блок соединен со вторым, третий блок необходимо соединить с двумя первыми. Составим из клеток многоканальных матриц проводимости $\mathbf{Y}_A$ и $\mathbf{Y}_B$ сводную матрицу $\mathbf{Y}_C$. Для наглядности будем полагать, что виртуальные каналы Флоке, обозначенные цифрами, остаются несвязанными, а виртуальные каналы Флоке, обозначенные буквами, попарно соединены между собой. Объединение многомодовых объектов *A*, *B* осуществляется по виртуальным каналам Флоке, обозначенным β и γ.



а) *б*)

Рис. 4 Рекомпозиция дескрипторов автономных блоков: *а* – фрагмент оптического фильтра; *б* – декомпозиционная схема фрагмента

Представим сводную матрицу $\mathbf{Y}_C$ в виде клеток, разделенных горизонтальными и вертикальными прямыми:

$$Y_c = \begin{array}{c|cccccc} & \beta & \gamma & 1 & 2 & 3 & \dots \\ \hline \beta & Y^{\beta\beta} & 0 & Y^{\beta 1} & Y^{\beta 2} & 0 & \dots \\ \gamma & 0 & Y^{\gamma\gamma} & 0 & 0 & Y^{\gamma 3} & \dots \\ 1 & Y^{1\beta} & 0 & Y^{11} & Y^{12} & 0 & \dots \\ 2 & Y^{2\beta} & 0 & Y^{21} & Y^{22} & 0 & \dots \\ 3 & 0 & Y^{3\gamma} & 0 & 0 & Y^{33} & \dots \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \end{array} \quad (8)$$

Клетки сводной матрицы $\mathbf{Y}_C$, в которых встречаются сочетания индексов, принадлежащих различным блокам, равны нулю. Совокупность индексов 1, 2, … обозначим через α, тогда выражение (8) можно записать более компактно:

$$Y_c = \begin{pmatrix} Y^{\beta\beta} & 0 & Y^{\beta\alpha} \\ 0 & Y^{\gamma\gamma} & Y^{\gamma\alpha} \\ Y^{\alpha\beta} & Y^{\alpha\gamma} & Y^{\alpha\alpha} \end{pmatrix}. \tag{9}$$

На основании (9) в терминах клеточных матриц имеем следующие матричные уравнения:

$$\begin{aligned} b_\beta &= Y^{\beta\beta} \cdot a_\beta + Y^{\beta\alpha} \cdot a_\alpha; \\ b_\gamma &= Y^{\gamma\gamma} \cdot a_\gamma + Y^{\gamma\alpha} \cdot a_\alpha; \\ b_\alpha &= Y^{\alpha\beta} \cdot a_\beta + Y^{\alpha\gamma} \cdot a_\gamma + Y^{\alpha\alpha} \cdot a_\alpha. \end{aligned} \tag{10}$$

Наложим на матричные уравнения условия связи для локальных систем координат граней параллелепипеда (см. рис. 3) $a_\beta = a_\gamma, b_\beta = -b_\gamma$, что соответствует непрерывности касательных, составляющих $\vec{E}_\tau^A = \vec{E}_\tau^B, \vec{H}_\tau^A = \vec{H}_\tau^B$, на гранях сшивания автономных блоков, и исключим векторы $a_\beta, a_\gamma, b_\beta, b_\gamma$. После несложных преобразований имеем

$$b_\alpha = \left(Y^{\alpha\alpha} - \left(Y^{\alpha\beta} + Y^{\alpha\gamma} \right) \cdot \left(Y^{\beta\beta} + Y^{\gamma\gamma} \right)^{-1} \cdot \left(Y^{\gamma\alpha} + Y^{\beta\alpha} \right) \right) \cdot a_\alpha. \tag{11}$$

Таким образом, многоканальная и многомодовая матрица проводимости $\mathbf{Y}$, полученная в результате объединения объектов A, B, будет определяться как

$$Y = Y^{\alpha\alpha} - (Y^{\alpha\beta} + Y^{\alpha\gamma}) \cdot (Y^{\beta\beta} + Y^{\gamma\gamma})^{-1} \cdot (Y^{\gamma\alpha} + Y^{\beta\alpha}). \tag{12}$$

Процесс рекомпозиции автономных блоков, которые описываются многоканальными и многомодовыми матрицами рассеяния, включает составление сводной матрицы $\mathbf{R}_C$, структура которой аналогична структуре сводной матрицы $\mathbf{Y}_C$ (9):

$$R_c = \begin{pmatrix} R^{\beta\beta} & 0 & R^{\beta\alpha} \\ 0 & R^{\gamma\gamma} & R^{\gamma\alpha} \\ R^{\alpha\beta} & R^{\alpha\gamma} & R^{\alpha\alpha} \end{pmatrix}. \tag{13}$$

В терминах клеточных матриц имеем следующие матричные уравнения, связывающие падающие и отраженные волны в связанных виртуальных каналах:

$$\begin{aligned} c_\beta^- &= R^{\beta\beta} \cdot c_\beta^+ + R^{\beta\alpha} \cdot c_\alpha^+; \\ c_\gamma^- &= R^{\gamma\gamma} c_\gamma^+ + R^{\gamma\alpha} \cdot c_\alpha^+; \\ c_\alpha^- &= R^{\alpha\beta} \cdot c_\beta^+ + R^{\alpha\beta} \cdot c_\gamma^+ + R^{\alpha\alpha} \cdot c_\alpha^+. \end{aligned} \tag{14}$$

На матричные уравнения (14) не наложено никаких условий связи; написанные в развернутой форме эти уравнения, в сущности, распадаются на системы, каждая из которых характеризует объекты A, B. Наложим на уравнения (14) условия связи $c_\beta^+ = c_\gamma^-, c_\beta^- = c_\gamma^+$ и исключим из них векторы $c_\beta^+, c_\beta^-, c_\gamma^+, c_\gamma^-$. После несложных преобразований имеем

$$R = R^{\alpha\alpha} - (R^{\alpha\beta} R^{\alpha\gamma}) \cdot \begin{pmatrix} -R^{\beta\beta} & I \\ I & -R^{\gamma\gamma} \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} R^{\beta\alpha} \\ R^{\gamma\alpha} \end{pmatrix}. \tag{15}$$

Рекомпозиция дескрипторов автономных блоков, описанных матрицами сопротивления, осуществляется по формуле, аналогичной (12):

$$Z = Z^{\alpha\alpha} + (Z^{\alpha\beta} + Z^{\alpha\gamma}) \cdot (Z^{\beta\beta} - Z^{\gamma\gamma})^{-1} \cdot (Z^{\gamma\alpha} - Z^{\beta\alpha}). \tag{16}$$

Краевое условие $\vec{E}_\tau = 0$ на гранях автономных блоков при использовании матрицы проводимости является фиксированным – оно не накладывается. Для автономного блока, описанного матрицей сопротивления, фиксированным является краевое условие $\vec{H}_\tau = 0$. Получим матричные выражения для наложения не фиксированных краевых условий.

Разделим матрицу проводимости **Y** автономного блока горизонтальной и вертикальной линиями на четыре клетки:

$$Y = \begin{array}{c|cc} & l & \alpha \\ \hline l & Y^{ll} & Y^{l\alpha} \\ \alpha & Y^{\alpha l} & Y^{\alpha\alpha} \end{array}. \tag{17}$$

Индексу l соответствуют грани автономного блока, на которых создается краевое условие $\vec{H}_\tau = 0$ (магнитная стенка), индексу α – грани, не подлежащие магнитному закорочению. В клеточных терминах на основании выражения (17) имеем следующие матричные уравнения:

$$\begin{aligned} b_l &= Y^{ll} \cdot a_l + Y^{l\alpha} \cdot a_\alpha; \\ b_\alpha &= Y^{\alpha l} \cdot a_l + Y^{\alpha\alpha} \cdot a_\alpha. \end{aligned} \tag{18}$$

Накладывая на матричные уравнения (18) условие $b_l = 0$, что эквивалентно $\vec{H}_\tau = 0$ на гранях блока, и исключая вектор a_l, определяем матрицу проводимости автономного блока:

$$Y = Y^{\alpha\alpha} - Y^{\alpha l} \cdot (Y^{ll})^{-1} \cdot Y^{l\alpha}. \tag{19}$$

Для автономного блока, который описывается матрицей сопротивления, для краевого условия $\vec{E}_\tau = 0$ (электрическая стенка) имеем аналогичное выражение

$$Z = Z^{\alpha\alpha} - Z^{\alpha l} \cdot (Z^{ll})^{-1} \cdot Y^{l\alpha}. \tag{20}$$

Краевые условия $\vec{E}_\tau = 0$ (электрическая стенка) и $\vec{H}_\tau = 0$ (магнитная стенка) для автономного блока, который описывается матрицей рассеяния **R**, накладываются так же, как и в случае матриц проводимости и сопротивления. При наложении краевых условий $\vec{H}_\tau = 0$ матрица рассеяния определяется матричным выражением

$$R = R^{\alpha\alpha} + R^{\alpha l} \cdot (I - R^{ll})^{-1} \cdot R^{l\alpha}, \tag{21}$$

при наложении краевых условий $\vec{E}_\tau = 0$ выражением

$$R = R^{\alpha\alpha} + R^{\alpha l} \cdot (I + R^{ll})^{-1} \cdot R^{l\alpha}. \tag{22}$$

На заключительном этапе матрица проводимости оптического фильтра преобразуется в матрицу рассеяния, из которой определяются коэффициенты отражения и пропускания

$$R = \frac{\left|c^-_{1(1)}\right|^2}{\left|c^+_{1(1)}\right|^2}, T = \frac{\left|c^-_{1(2)}\right|^2}{\left|c^+_{1(1)}\right|^2}, \ (R + T = 1). \tag{23}$$

Падающая волна $\vec{E}^0, \vec{H}^0$ и с ней поле дифракции подчинены теореме Флоке в форме [2]:

$$\begin{cases} \vec{E}(x+a,y,z)=\vec{E}(x,y,z)\exp(-i\varphi_x) \\ \vec{H}(x+a,y,z)=\vec{H}(x,y,z)\exp(-i\varphi_x) \\ \vec{E}(x,y+b,z)=\vec{E}(x,y,z)\exp(-i\varphi_y) \\ \vec{H}(x,y+b,z)=\vec{H}(x,y,z)\exp(-i\varphi_y) \end{cases}, \tag{24}$$

где $\varphi_x=\Gamma_n a\cos\alpha$, $\varphi_y=\Gamma_n b\cos\beta$; α,β – углы ориентации направления распространения волнового процесса (см. рис. 2). Угол падения θ с углами α и β связан соотношением $\cos^2\alpha+\cos^2\beta+\cos^2\theta=1$. Требованию (24) будет также удовлетворять система скалярных функций $\{u_{mn}\}$:

$$u_{mn}=C\exp\left(i\left(\frac{2\pi m+\varphi_x}{a}x+\frac{2\pi n+\varphi_y}{b}y-\Gamma_{mn}z\right)\right), \tag{25}$$

где $\Gamma_{mn}=\sqrt{\omega^2\varepsilon_0\mu_0\varepsilon\mu-\chi_{mn}^2}=\sqrt{\omega^2\varepsilon_0\mu_0\varepsilon\mu-\left(\frac{2\pi m+\varphi_x}{a}\right)^2-\left(\frac{2\pi m+\varphi_y}{a}\right)^2}$, являющихся решениями уравнения Гельмгольца $\nabla_\perp^2 u_{mn}+\chi_{mn}^2 u_{mn}=0$.

Построение векторных функций $\vec{E}_{mn}$, $\vec{H}_{mn}$ как E-волны при $\vec{E}_{mn}^z=\vec{z}_0 u_{mn}$ и как H-волны при $\vec{H}_{mn}^z=\vec{z}_0 u_{mn}$ проводилось по следующей методике.

Собственные волны канала Флоке определим из решения краевой задачи для уравнения Максвелла с периодическими условиями на стенках канала. Запишем уравнения Максвелла для гармонических колебаний [2]:

$$\begin{aligned} \mathrm{rot}\vec{H}_m &= i\omega\varepsilon_0\varepsilon\vec{E}_m; \\ \mathrm{rot}\vec{E}_m &= -i\omega\mu_0\mu\vec{H}_m, \end{aligned} \tag{26}$$

где $\omega=2\pi f$ – круговая частота колебаний; $\vec{E}_m$, $\vec{H}_m$ – амплитуды напряженностей электрического и магнитного полей; ε, μ – относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости; ε_0, μ_0 – электрическая и магнитная постоянные.

Уравнения Максвелла (26) в прямоугольной декартовой системе координат имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial H_{mz}}{\partial y}-\dfrac{\partial H_{my}}{\partial z}=i\omega\varepsilon_0\varepsilon E_{mx}, \\ \dfrac{\partial H_{mz}}{\partial x}-\dfrac{\partial H_{mx}}{\partial z}=-i\omega\varepsilon_0\varepsilon E_{my}, \\ \dfrac{\partial H_{my}}{\partial x}-\dfrac{\partial H_{mx}}{\partial y}=i\omega\varepsilon_0\varepsilon E_{mz}; \end{cases} \quad \begin{cases} \dfrac{\partial E_{mz}}{\partial y}-\dfrac{\partial E_{my}}{\partial z}=-i\omega\mu_0\mu H_{mx}, \\ \dfrac{\partial E_{mz}}{\partial x}-\dfrac{\partial E_{mx}}{\partial z}=i\omega\mu_0\mu H_{my}, \\ \dfrac{\partial E_{my}}{\partial x}-\dfrac{\partial E_{mx}}{\partial y}=-i\omega\mu_0\mu H_{mz}; \end{cases} \tag{27}$$

здесь E_{mx}, E_{my}, E_{mz}, H_{mx}, H_{my}, H_{mz} – соответственно компоненты векторов электрического и магнитного полей $\vec{E}_m$ и $\vec{H}_m$.

Решение уравнений Максвелла (27) для бесконечно протяженного канала Флоке будем искать в виде плоской неоднородной волны [2]:

$$\vec{E}_m = \vec{E}(x,y)\exp(-i\Gamma z),\ \ \vec{H}_m = \vec{H}(x,y)\exp(-i\Gamma z), \tag{28}$$

где $\vec{E}(x,y), \vec{H}(x,y)$ – функции, характеризующие распределение электромагнитного поля на поперечном сечении канала Флоке; Г – постоянная распространения волны в канале Флоке. Внося выражения (28) в системы уравнений (27), имеем

$$\begin{cases} \dfrac{\partial E_z}{\partial y} + i\Gamma E_y = -i\omega\mu_0\mu H_x, \\ \dfrac{\partial E_z}{\partial x} + i\Gamma E_x = i\omega\mu_0\mu H_y, \\ \dfrac{\partial E_y}{\partial x} - \dfrac{\partial E_x}{\partial y} = -i\omega\mu_0\mu H_z; \end{cases} \quad \begin{cases} \dfrac{\partial H_z}{\partial y} + i\Gamma H_y = i\omega\varepsilon_0\varepsilon E_x, \\ \dfrac{\partial H_z}{\partial x} + i\Gamma H_x = -i\omega\varepsilon_0\varepsilon E_y, \\ \dfrac{\partial H_y}{\partial x} - \dfrac{\partial H_x}{\partial y} = i\omega\varepsilon_0\varepsilon E_z, \end{cases} \tag{29}$$

где E_x, E_y, E_z, H_x, H_y, H_z – соответственно компоненты векторов $\vec{E}(x,y)$ и $\vec{H}(x,y)$.

В уравнениях (29) поперечные компоненты E_x, E_y, H_x, H_y можно выразить через продольные, т.е. E_z, H_z. Действительно, первая строка в левом столбце и вторая в правом – это система линейных алгебраических уравнений относительно E_y и H_x, а вторая строка в левом столбце и правом в первом – такая же система относительно E_x и H_y. Запишем решения этих алгебраических систем:

$$\begin{aligned} E_x &= -\frac{i\Gamma}{\chi^2}\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{i\omega\mu_0\mu}{\chi^2}\frac{\partial H_z}{\partial y};\ H_x = \frac{i\omega\varepsilon_0\varepsilon}{\chi^2}\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{i\Gamma}{\chi^2}\frac{\partial H_z}{\partial x}; \\ E_y &= -\frac{i\Gamma}{\chi^2}\frac{\partial E_z}{\partial y} + \frac{i\omega\mu_0\mu}{\chi^2}\frac{\partial H_z}{\partial x};\ H_y = -\frac{i\omega\varepsilon_0\varepsilon}{\chi^2}\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{i\Gamma}{\chi^2}\frac{\partial H_z}{\partial y}. \end{aligned} \tag{30}$$

Полученным выражениям (30) можно придать более компактный вид. Обозначая поперечные составляющие части векторов $\vec{E}(x,y)$, $\vec{H}(x,y)$ символами $\vec{E}_t$, $\vec{H}_t$:

$$\vec{E}_t = E_x\vec{i} + E_y\vec{j};\ \ \vec{H}_t = H_x\vec{i} + H_y\vec{j},$$

находим

$$\vec{E}_t = -\frac{i\Gamma}{\chi^2}\nabla_\perp\vec{E}_z - \frac{i\omega\mu_0\mu}{\chi^2}\mathrm{rot}_\perp\vec{H}_z;\ \ \vec{H}_t = \frac{i\omega\varepsilon_0\varepsilon}{\chi^2}\mathrm{rot}_\perp\vec{E}_z - \frac{i\Gamma}{\chi^2}\nabla_\perp\vec{H}_z, \tag{31}$$

где $\chi^2 = \omega^2\varepsilon_0\varepsilon\mu_0\mu - \Gamma^2$; ∇ – оператор Лапласа; $\perp$ – символ, который обозначает, что операция производится по координатам, лежащим в поперечной плоскости z = const, $\vec{E}_z = E_z\vec{k}, \vec{H}_z = H_z\vec{k}$; $\vec{i}$, $\vec{j}$, $\vec{k}$ – единичные орты, направленные соответственно вдоль координатных осей *ox*, *oy*, *oz*.

Поперечные компоненты электромагнитного поля плоской неоднородной волны состоят из двух частей (31), одна из которых обращается в нуль вместе с компонентой $\vec{E}_z$, а другая – с $\vec{H}_z$. Частный класс плоских неоднородных волн составляют такие, которые лишены продольной компоненты $H_z = 0$. Такие волны называются *E*-волнами (электрическими волнами) [2].

Положив в выражениях (31) $H_z = 0$, с учетом выражений (28) получаем следующие выражения для векторов поля для волн этого класса:

$$\begin{cases} \vec{E}_m = \left(\vec{E}_z - \dfrac{i\Gamma}{\chi^2}\nabla_\perp\vec{E}_z\right)\exp(-i\Gamma z); \\ \vec{H}_m = \dfrac{i\omega\varepsilon_0\varepsilon}{\chi^2}\mathrm{rot}_\perp\vec{E}_z\exp(-i\Gamma z), \end{cases} \tag{32}$$

Другой частный класс образуют плоские неоднородные волны без продольной электрической компоненты $E_z = 0$. Такие волны называются *H*-волнами (магнитные волны) [2]. Взяв в выражениях (31) $E_z = 0$, получаем

$$\begin{cases} \vec{E}_m = \dfrac{i\omega\mu_0\mu}{\chi^2}\operatorname{rot}_\perp \vec{H}_z \exp(-i\Gamma z); \\ \vec{H}_m = \left(\vec{H}_z - \dfrac{i\Gamma}{\chi^2}\nabla_\perp \vec{H}_z\right)\exp(-i\Gamma z). \end{cases} \tag{33}$$

Третий частный класс включает чисто поперечные волны $E_z = 0$, $H_z = 0$, которые называются *TEM*-волнами (поперечно-электромагнитные) [2]. Из выражений (31) видно, что если $E_z = 0$ и $H_z = 0$, то при $\chi^2 \neq 0$ обращаются в нуль все компоненты поля, а это значит, что *TEM*-волны не существуют. Однако данный запрет снимается при $\chi^2 \neq 0$, поскольку выражения всех поперечных компонент становятся при этом неопределенностями вида $\frac{0}{0}$, где 0 – бесконечно малые величины.

Поле *TEM*-волны можно рассматривать как предельный случай *E*-волны при $E_z \to 0$, $\chi \to 0$ или *H*-волны при $H_z \to 0$, $\chi \to 0$. Поэтому для *TEM*-волн на основании выражений (32) и (33) имеем следующие выражения:

$$\begin{cases} \vec{E}_m = \nabla_\perp \varphi \exp(-i\Gamma z); \\ \vec{H}_m = \sqrt{\dfrac{\varepsilon_0\varepsilon}{\mu_0\mu}}\left(\vec{k}\times\nabla_\perp\varphi\right)\exp(-i\Gamma z), \end{cases} \tag{34}$$

где $\varphi = \lim\limits_{E_z\to 0,\chi\to 0} \dfrac{-i\Gamma}{\chi^2}E_z$,

$$\begin{cases} \vec{E}_m = \sqrt{\dfrac{\mu_0\mu}{\varepsilon_0\varepsilon}}\left(\nabla_\perp\psi\times\vec{k}\right)\exp(-i\Gamma z); \\ \vec{H}_m = \nabla_\perp\psi\exp(-i\Gamma z); \end{cases} \tag{35}$$

здесь $\psi = \lim\limits_{H_z\to 0,\chi\to 0} \dfrac{-i\Gamma}{\chi^2}H_z$.

Преобразуем уравнения Максвелла (26). Применяя операцию rot к первому уравнению и подставляя в него второе уравнение, имеем

$$\operatorname{rot}\ \operatorname{rot}\vec{H}_m = \omega^2\varepsilon_0\varepsilon\mu_0\mu\vec{H}_m\,. \tag{36}$$

Используя дифференциальные формулы векторного анализа [4], из уравнения (36) получаем

$$\operatorname{grad}\operatorname{div}\vec{H}_m - \nabla^2\vec{H}_m = \omega^2\varepsilon_0\mu_0\varepsilon\mu\vec{H}_m\,. \tag{37}$$

Применяя операцию div ко второму уравнению Максвелла и используя дифференциальные формулы векторного анализа [4], имеем

$$\operatorname{div}\vec{H}_m = 0\,. \tag{38}$$

С учетом выражения (38) уравнение (37) имеет вид

$$\nabla^2\vec{H}_m + \omega^2\varepsilon_0\mu_0\varepsilon\mu\vec{H}_m = 0\,. \tag{39}$$

Дифференциальное уравнение (39) является уравнением электродинамики второго порядка. Аналогично можно получить дифференциальное уравнение второго порядка относительно $\vec{E}_m$:

$$\nabla^2\vec{E}_m + \omega^2\varepsilon_0\mu_0\varepsilon\mu\vec{E}_m = 0\,. \tag{40}$$

Подставляя выражения (28) для плоских неоднородных волн в выражения (39) и (40), получаем двухмерные векторные уравнения Гельмгольца

$$\begin{aligned} &\nabla_{\perp}^{2}\vec{E}(x,y)+\chi^{2}\vec{E}(x,y)=0;\\ &\nabla_{\perp}^{2}\vec{H}(x,y)+\chi^{2}\vec{H}(x,y)=0, \end{aligned} \tag{41}$$

где $\chi^2=\omega^2\varepsilon_0\mu_0\varepsilon\mu-\Gamma^2$, которые применяются при изучении электромагнитных волн в волновых каналах Флоке. Каждое из векторных уравнений (41) эквивалентно трем скалярным относительно E_x, E_y, E_z и H_x, H_y, H_z. Поперечные компоненты волн E_x, E_y, H_x, H_y определяются через продольные E_z, H_z. Сформулируем и решим краевые задачи для уравнений Гельмгольца относительно E_z, H_z. Используя формулы (32)–(35), определим поперечные компоненты волн E_x, E_y, H_x, H_y.

Краевая задача для определения E_z формулируется в виде [5]

$$\begin{cases} \dfrac{\partial^2 E_Z(x,y)}{\partial x^2}+\dfrac{\partial^2 E_Z(x,y)}{\partial y^2}+\chi^2 E_Z(x,y)=0\\ E_Z\left(-\dfrac{a}{2},y\right)=E_Z\left(\dfrac{a}{2},y\right); E_Z\left(x,-\dfrac{b}{2}\right)=E_Z\left(x,\dfrac{b}{2}\right); \end{cases} \tag{42}$$

Решение краевой задачи (45) имеет вид [4]

$$E_Z=E_Z^{mn}=E_0\exp\left(i\left(\frac{2\pi m}{a}x+\frac{2\pi m}{b}y\right)\right); \tag{43}$$

$$\chi^2=\chi_{mn}^2=\left(\frac{2\pi m}{a}\right)^2+\left(\frac{2\pi n}{b}\right)^2, m=0,\pm1,\pm2,...; n=0,\pm1,\pm2,...$$

где E_0 – неопределенный амплитудный коэффициент; E_z^{mn} – собственные функции задачи (42); χ_{mn}^2 – собственные значения, т.е. значения параметра χ^2 в выражениях (42), при которых реализуются решения. Они составляют бесконечное множество, причем каждая из функций E_z^{mn} характеризует распределение продольной компоненты вектора $\vec{E}$ той или иной собственной волны на поперечном сечении канала Флоке. Подставляя выражения (43) в систему уравнений (32), получаем компоненты поля *E*-волн прямоугольного канала Флоке

$$\begin{cases} E_{mn}^{z}=E_0\exp\left(i\left(\dfrac{2\pi m}{a}x+\dfrac{2\pi n}{b}y\right)\right)\exp(-i\Gamma z);\\ E_{mn}^{x}=E_0\dfrac{\Gamma}{\chi^2}\dfrac{2\pi m}{a}\exp\left(i\left(\dfrac{2\pi m}{a}x+\dfrac{2\pi n}{b}y\right)\right)\exp(-i\Gamma z);\\ E_{mn}^{y}=E_0\dfrac{\Gamma}{\chi^2}\dfrac{2\pi n}{b}\exp\left(i\left(\dfrac{2\pi m}{a}x+\dfrac{2\pi n}{b}y\right)\right)\exp(-i\Gamma z);\\ H_{mn}^{x}=-E_0\dfrac{\omega\varepsilon_0\varepsilon}{\chi^2}\dfrac{2\pi n}{b}\exp\left(i\left(\dfrac{2\pi m}{a}x+\dfrac{2\pi n}{b}y\right)\right)\exp(-i\Gamma z);\\ H_{mn}^{y}=-E_0\dfrac{\omega\varepsilon_0\varepsilon}{\chi^2}\dfrac{2\pi m}{a}\exp\left(i\left(\dfrac{2\pi m}{a}x+\dfrac{2\pi n}{b}y\right)\right)\exp(-i\Gamma z); \end{cases} \tag{44}$$

где $\Gamma=\Gamma_{mn}=\sqrt{\omega^2\varepsilon_0\mu_0\varepsilon\mu-\left(\dfrac{2\pi m}{a}\right)^2-\left(\dfrac{2\pi n}{b}\right)^2}$ – постоянная распространения *E*-волны.

На основании системы уравнений (34) при $m = 0$, $n \to 0$ или $n = 0$, $m \to 0$ поле E-волны переходит в поле TEM-волны. Например, при $n = 0$, $m \to 0$ поле TEM-волны имеет следующую структуру:

$$\begin{cases} E_{mx} = E_0 \Gamma \exp(-i\Gamma z); \\ E_{my} = E_0 \omega \varepsilon_0 \varepsilon \exp(-i\Gamma z); \end{cases}$$

где $\Gamma = \omega\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon \mu}$.

Краевая задача для определения H_z формулируется в виде

$$\begin{cases} \dfrac{\partial^2 H_z(x,y)}{\partial x^2} + \dfrac{\partial^2 H_z(x,y)}{\partial y^2} + \chi^2 H_z(x,y) = 0 \\ H_Z\left(-\dfrac{a}{2}, y\right) = H_Z\left(\dfrac{a}{2}, y\right); H_Z\left(x, -\dfrac{b}{2}\right) = H_Z\left(x, \dfrac{b}{2}\right). \end{cases}$$

Решение краевой задачи имеет вид [6]

$$H_z = H_z^{mn} = H_0 \exp\left(i\left(\frac{2\pi m}{a}x + \frac{2\pi n}{b}y\right)\right); \tag{45}$$

$$\chi^2 = \chi_{mn}^2 = \left(\frac{2\pi m}{a}\right)^2 + \left(\frac{2\pi n}{b}\right)^2, m = 0, \pm 1, \pm 2, ...; n = 0, \pm 1, \pm 2, ...$$

Подставляя выражения (45) в систему уравнений (33), получаем компоненты поля H-волн прямоугольного канала Флоке

$$\begin{cases} H_{mn}^z = H_0 \exp\left(i\left(\dfrac{2\pi m}{a}x + \dfrac{2\pi n}{b}y\right)\right)\exp(-i\Gamma z); \\ H_{mn}^x = H_0 \dfrac{\Gamma}{\chi^2}\dfrac{2\pi m}{a}\exp\left(i\left(\dfrac{2\pi m}{a}x + \dfrac{2\pi n}{b}y\right)\right)\exp(-i\Gamma z); \\ H_{mn}^y = H_0 \dfrac{\Gamma}{\chi^2}\dfrac{2\pi n}{b}\exp\left(i\left(\dfrac{2\pi m}{a}x + \dfrac{2\pi n}{b}y\right)\right)\exp(-i\Gamma z); \\ E_{mn}^x = H_0 \dfrac{\omega\varepsilon_0\varepsilon}{\chi^2}\dfrac{2\pi n}{b}\exp\left(i\left(\dfrac{2\pi m}{a}x + \dfrac{2\pi n}{b}y\right)\right)\exp(-i\Gamma z); \\ E_{mn}^y = -H_0 \dfrac{\omega\varepsilon_0\varepsilon}{\chi^2}\dfrac{2\pi m}{a}\exp\left(i\left(\dfrac{2\pi m}{a}x + \dfrac{2\pi n}{b}y\right)\right)\exp(-i\Gamma z); \end{cases} \tag{46}$$

где $\Gamma = \Gamma_{mn} = \sqrt{\omega^2\varepsilon_0\mu_0\varepsilon\mu - \left(\dfrac{2\pi m}{a}\right)^2 - \left(\dfrac{2\pi n}{b}\right)^2}$ – постоянная распространения H-волны.

Выражения (44) и (46) являются собственными волнами прямоугольного канала Флоке с краевыми условиями (рис. 5):

$$\begin{aligned} &\vec{E}\left(-\frac{a}{2}, y\right) = \vec{E}\left(-\frac{a}{2}, y\right)\exp(-i\varphi_x), \vec{H}\left(-\frac{a}{2}, y\right) = \vec{H}\left(-\frac{a}{2}, y\right)\exp(-i\varphi_x), \\ &\vec{E}\left(x, -\frac{b}{2}\right) = \vec{E}\left(x, \frac{b}{2}\right)\exp(-i\varphi_y), \vec{H}\left(x, -\frac{b}{2}\right) = \vec{H}\left(x, \frac{b}{2}\right)\exp(-i\varphi_y). \end{aligned} \tag{47}$$

На рис. 6 показана расчетная и экспериментальная спектральная характеристика коэффициента пропускания одиннадцатислойного узкополосного фильтра α-Si/SiO_2 . Конструкция выбра-

на с λ/2-низкопреломляющим слоем внутри набора из четвертьволновых чередующихся слоев с высоким и низким показателем преломления, т.е. структура представляла собой фильтр Фабри–Перо. У такого фильтра коэффициент отражения высок, а коэффициент пропускания мал для всех длин волн, кроме узкого диапазона.

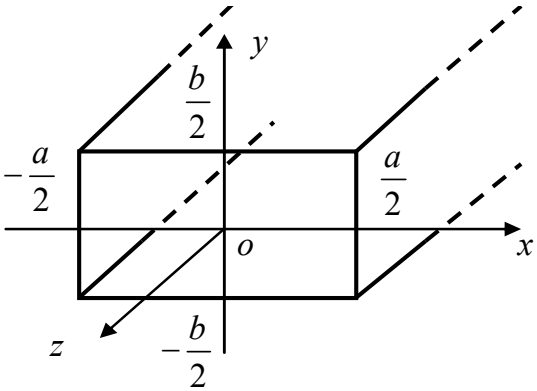


Рис. 5. Прямоугольный канал Флоке: *a*, *b* – размеры волновода

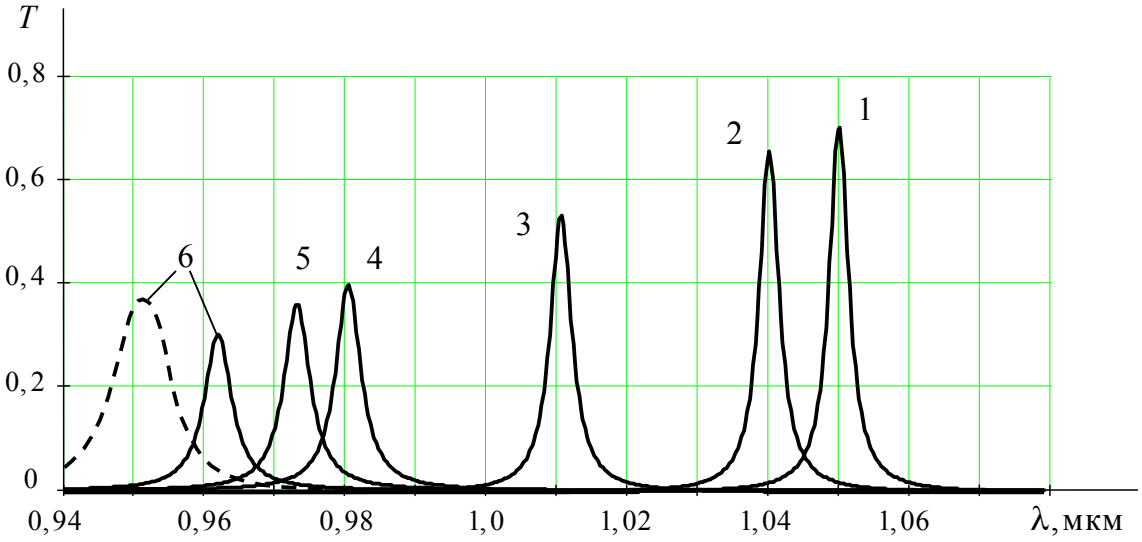


Рис. 6. Угловая зависимость коэффициента *T* пропускания одиннадцатислойного узкополосного фильтра α-Si/SiO$_2$: кривая 1 – θ = 0°; 2 – θ = 15°; 3 – θ = 30°;4 – θ = 40°; 5 – θ = 42°; 6 – θ = 45°;
здесь: —— – одномерная электродинамическая модель; - - - - – эксперимент [6]; nd = λ/4 = 0,2625 мкм

Наиболее широко распространенная технология изготовления диэлектрических покрытий оптического фильтра – электронно-лучевое испарение, которое на длину покрытия ΔL = 300 нм дает отклонение от расчетных значений толщины покрытия порядка Z_{max} = 3…5 нм. Это и является основной причиной расхождения экспериментальных результатов с теоретическими результатами.

На рис. 7 показаны реализации случайного коэффициента пропускания одиннадцатислойного узкополосного фильтра α-Si/SiO$_2$ при среднеквадратичных отклонениях толщины диэлектрических покрытий $\sigma_{h_i} = \sigma_{l_i} = 4$ нм. Реализации получены с помощью трехмерной электродинамической модели. Резонансные длины волн являются случайными величинами. В результате статистической обработки по 20 реализациям получены следующие результаты.

Математическое ожидание значения резонансной длины волны равно $\lambda^M_{\text{рез}} = 0{,}961$ мкм, среднеквадратичное отклонение $\sigma_{\lambda_{\text{рез}}} = 0{,}0073$ мкм. Эти результаты согласуются с экспериментальными и теоретическими результатами, показанными на рис. 6.

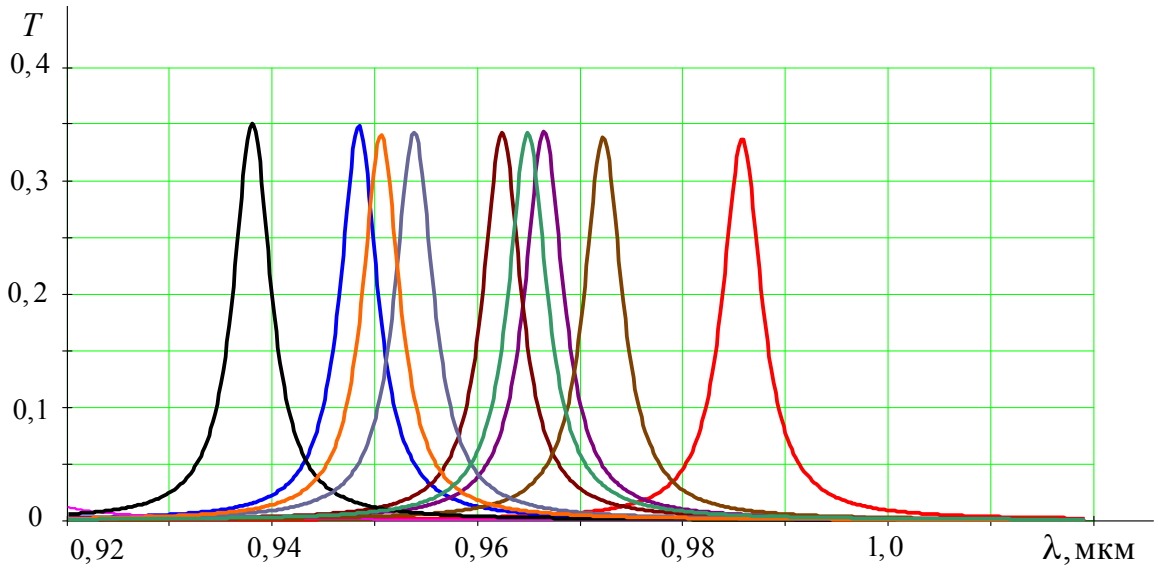


Рис. 7. Реализации случайного коэффициента пропускания одиннадцатислойного узкополосного фильтра: $\theta = 45°$; $\sigma_{h_i} = \sigma_{l_i} = 4$ нм

Список литературы

1. Никольский, В. В. Электродинамика и распространение радиоволн / В. В. Никольский, Т. И. Никольская. – М. : Наука, 1989. – 544 с.
2. Никольский, В. В. Проекционный метод для незамкнутых электродинамических систем / В. В. Никольский // Радиотехника и электроника. – 1971. – Т. 16, № 8. – С. 1342.
3. Чиркина, М. А. Математическое моделирование устройств сверхвысоких частот на магнитных нанокомпозитах / М. А. Чиркина, Н. К. Юрков, А. Н. Якимов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 11. – С. 166–175.
4. Корн, Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1974. – 701 с.
5. Тихонов, А. Н. Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – М. : Наука, 1972. – 437 с.
6. Ершов, А. В. Многослойные оптические покрытия / А. В. Ершов, А. И. Машин. – Нижний Новгород, 2006. – 99 с.

УДК 623.4.055

Пимкин, А. Д.

Математическое моделирование оптических фильтров Фабри–Перо при наклонном падении электромагнитной волны / А. Д. Пимкин // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 2. – С. 27–39.

Пимкин Александр Дмитриевич
заместитель командира,
в/ч 38994,
Москва, Кремль, 9

A. Pimkin
deputy commander,
VCh 38994,
Moscow, the Kremlin, 9

Аннотация. Предложена математическая модель дифракции плоской однородной электромагнитной волны на двумерно периодической структуре под произвольным углом. Разработана методика преобразования матрицы проводимости на примере интерференционного фильтра Фабри–Перо в базисе каналов Флоке автономных блоков. Для определения коэффициентов отражения и пропускания фильтра дано математическое описание процедуры пре-

Abstract. A mathematical model of the diffraction of a plane electromagnetic wave on a uniform two-dimensional periodic structure at an arbitrary angle. The technique of pre-form a matrix of conductivity on the example of interference filter Fabry-Perot in the basis of channels Floquet autonomous units. To determine the reflection and transmission coefficients filter gives a mathematical description of Procedure of the transformation matrix of the conductivity in the scattering ma-

образования матрицы проводимости в матрицу рассеяния. Полученные расчетные спектральные характеристики коэффициентов пропускания одиннадцатислойного узкополосного фильтра Фабри–Перо имеют удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными.

Ключевые слова: интерференционный фильтр Фабри–Перо, плоская однородная электромагнитная волна, дифракция, математическое моделирование, коэффициенты отражения и пропускания.

trix. Obtained calculated the spectral characteristics of the transmittance odinnadtsatisloynogo narrowband filter Fabry-Perot have satisfactory agreement with the experimental data

Key words: interference filter Fabry-Perot plane homogeneous electromagnetic wave diffraction, mathematical modeling, reflection and transmission coefficients.

УДК 519.7

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМЫ

В. К. Дедков

Принципы «минимакса» и «максимина» можно назвать «перестраховочными» принципами выбора оптимального решения при проектировании технической системы.

В противовес «перестраховочному» принципу выбора оптимального решения рассмотрим принцип «умеренного риска», **называемый принципом Байеса–Лапласа** [1].

Рассмотрим пример применения теории игр к выбору технических решений в процессе проектирования системы, определяющих технические параметры будущей системы при минимальных затратах на достижение цели ее применения. Задачи оптимального (в определенном смысле) выбора решения возникают при проектировании сложной технической системы, такой, например, как транспортный космический корабль многоцелевого назначения (ТКК), не имеющий аналогов, или другие системы, опыт применения которых к началу проектирования отсутствует.

Согласно принципу Байеса–Лапласа возможным вариантам внешних условий применения проектируемой системы приписываются **определенные вероятности** их осуществления, сумма которых равна единице.

Использование этого принципа предполагает как бы отступление от условий полной неопределенности, хотя сами вероятности назначаются априори и отражают скорее интуицию исследователя, чем объективное значение вероятности будущей ситуации (в противном случае задача могла бы быть решена методами стохастического программирования, и применение каких-либо специальных принципов решения не потребовалось бы).

Приведем расчеты удельных приведенных затрат на единицу полезной нагрузки каждого варианта проектируемого ТКК в различных условиях их возможной реализации.

Результаты этих расчетов сведем в табл. 1.

Таблица 1

Вариант ТКК	Удельные приведенные затраты в условных единицах стоимости при различных вариантах внешних условий			
	I	II	III	IV
I	0,30	0,48	0,81	0,85
II	0,55	0,33	0,78	0,68
III	0,63	0,93	0,35	0,53
IV	0,98	0,83	0,63	0,38

Если предположить, что каждый из четырех вариантов внешних условий применения ТКК может реализоваться с одинаковой вероятностью (принцип **равной вероятности**), то применение принципа Байеса–Лапласа к выбору варианта ТКК дает значения приведенных удельных затрат на единицу полезной массы, указанные в табл. 2.

Таблица 2

Вариант ТКК	Условная единица стоимости ТКК, приходящаяся на единицу полезной массы
I	$1/4\,(0{,}30 + 0{,}48 + 0{,}81 + 0{,}85) = 0{,}61$
II	$1\Big/4\sum_{i=1}^{4} a_{2i} = 0{,}585$
III	$1\Big/4\sum_{i=1}^{4} a_{3i} = 0{,}61$
IV	$1\Big/4\sum_{i=1}^{4} a_{4i} = 0{,}7075$

Определенные таким образом средние наибольшие затраты позволяют сформулировать критерий выбора оптимального варианта проектируемого ТКК: $\min_j a_{\text{ср}j} = a_{\text{опт}}$.

Как видно из табл. 2, таким является второй вариант, и рекомендации о выборе варианта в соответствии с критерием Байеса–Лапласа совпадают с рекомендациями, сделанными на основе минимакса.

Принцип Гурвица по смыслу близок к рассмотренному принципу Байеса–Лапласа, т.е. принципу «умеренного риска».

В соответствии с этим принципом выбор «оптимального» решения производится по критерию минимума средней арифметической двух крайних значений приведенных удельных затрат, т.е. затрат, соответствующих наиболее и наименее благоприятным состояниям «природы».

В рассматриваемом примере средние арифметические крайних значений показателей затрат на выполнение задачи ТКК приведены в табл. 3.

Таблица 3

Вариант ТКК	Условная единица стоимости ТКК на единицу полезной массы
I	(0,30 + 0,85) : 2 = 0,575
II	(0,30 + 0,78) : 2 = 0,555
III	(0,33 + 0,93) : 2 = 0,64
IV	(0,38 + 0,98) : 2 = 0,68

Применяя критерий эффективности, соответствующий принципу Гурвица, находим, что «лучшим» в смысле принятого критерия является второй вариант применения ТКК.

Рассмотрим **принцип минимакса последствий ошибочного решения**, называемый принципом Сэведжа.

Суть этого принципа заключается в сопоставлении последствий принятого решения с последствиями того решения, которое могло быть принято в случае, если бы было достоверно известно будущее состояние «природы» или, иными словами, если бы условия применения ТКК были однозначно определены.

Пусть, например, принято решение проектировать и изготовить ТКК по варианту I его применения. Тогда в случае реализации варианта I внешних условий ТКК будет полностью им соответствовать, и достигнутая величина удельных приведенных затрат окажется минимально возможной.

Если ТКК, предназначенный для реализации по I варианту внешних условий его применения, использовать для реализации по II варианту условий применения, то при этом приведенные удельные затраты на единицу полезной массы возрастут, а величина потерь составит при этом 53 – 30 = 23 условные единицы стоимости на единицу полезной массы.

Подобным образом можно оценить ожидаемые потери для других вариантов использования ТКК при их применении и иных (не наилучших) вариантах внешних условий.

В табличной форме эти потери представляют собой так называемую **матрицу последствий ошибочных решений** или матрицу альтернативных потерь (табл. 4).

Таблица 4

Вариант ТКК	Ожидаемые потери (в усл. ед. стоим. на ед. пол. массы) при вариантах внешних воздействий			
	I	II	III	IV
I	0	0,15	0,46	0,47
II	0,23	0	0,43	0,30
III	0,33	0,60	0	0,15
IV	0,68	0,50	0,28	0

Максимально возможные потери при использовании ТКК по различным вариантам согласно табл. 4 приобретают следующие значения (табл. 5).

Таблица 5

Вариант	Условная единица стоимости ТКК на единицу полезной массы
I	0,47
II	0,43
III	0,60
IV	0,68

Принцип минимакса последствий ошибочного решения состоит в том, чтобы не допустить чрезмерно высоких потерь из-за ошибочных решений.

Поэтому в качестве рекомендуемого критерия для отбора решения предлагается критерий **минимума потерь при реализации ошибочного решения**.

Таким вариантом является II. При его реализации ожидаемые потери не превзойдут 0,43 условные единицы стоимости на единицу полезной массы, даже в том случае, если будет использован второй («не расчетный») вариант внешних условий.

Рассмотренные выше способы оценивания влияния различных критериев на выбор оптимального варианта ТКК показывают, что применение любого критерия приводит к выбору одного и того же варианта ТКК (варианта II), т.е. к одному и тому же решению. Этот случай можно назвать «идеальным». Более общей представляется такая постановка задачи, когда различные критерии выбора «подсказывают» разные решения.

Условные данные такого примера приведены в табл. 6.

Таблица 6

Вариант ТКК	Удельные приведенные затраты (в усл. ед. затр. на ед. пол. массы) при вариантах внешних условий		
	I	II	III
I	0,45	0,48	0,40
II	0,60	0,20	0,30
III	0,45	0,50	0,15
IV	0,65	0,20	0,15

Данным табл. 6 соответствуют следующие оценки затрат по рассмотренным выше критериям и рекомендации о принятии решений в соответствии с этими критериями (результаты расчетов сведены в табл. 7).

Таблица 7

Вариант ТКК	Критерии выбора решения			
	минимакса	Байеса–Лапласа	Гурвица	Сэведжа
I	0,48	0,44	0,44	0,28
II	0,60	0,37	0,40	0,15
III	0,50	0,37	0,32	0,30
IV	0,65	0,33	0,40	0,20
Наилучший вариант по принятому критерию	I	IV	III	II

П р и м е ч а н и е. Вариант IV удовлетворяет одновременно условиям II и III.

Руководствуясь полученными оценками, нельзя объективно выделить оптимальный вариант ТКК.

Можно предположить, что выбирающее лицо вправе принять принцип отбора оптимального варианта по своему усмотрению на основе интуиции или в зависимости от свойств характера, темперамента и т.п. Однако такая точка зрения открывает дорогу субъективизму, облаченному в «тогу» научной обоснованности.

Какое же решение следует принять? Прежде, чем ответить на этот вопрос, следует задать себе другой: «А всегда ли есть необходимость выбирать единственное решение в столь неопределенной ситуации?». Процесс создания новой техники, и ТКК в том числе, есть процесс исследовательского уменьшения неопределенности. Поэтому цель принятия решения на раннем этапе проектирования не столько в определении оптимального варианта ТКК, сколько в выборе стратегии

разработки проекта. А эта стратегия сводится к последовательному уменьшению альтернатив по мере продвижения разработки от стадии к стадии и одновременно к последовательному накоплению информации.

Так, если первый пример отнести к стадии аванпроекта, то имеется смысл остановиться на втором варианте и рекомендовать его в качестве основы для эскизного проекта, а во втором примере целесообразно проработать эскизный проект во всех четырех вариантах, выполнив параллельно комплекс исследований, направленных на получение дополнительной информации о внешних условиях его использования.

На стадии эскизного проекта оценка эффективности должна быть проведена снова и по ее результатам рекомендованы один-два варианта для разработки технического проекта и т.д. На каждом этапе снижается степень исходной неопределенности.

Для целенаправленного получения недостающей информации и обоснования решения может быть использован метод «активного многофакторного эксперимента».

Изложенные модели применения математических методов оптимизации и выбора решения применимы, в основном, для рассмотрения частных задач. Если задачи более или менее общие, то их решение с применением приведенных выше методов возможно лишь в самой упрощенной постановке, характерной для начальной стадии проектирования.

Во всех остальных случаях испытанным оружием исследователя является традиционный метод «перебора» вариантов. А попытки применить строгие математические приемы оптимизации и на их основе выбрать наилучшие решения терпят неудачу из-за невозможности корректно сформулировать стоящую перед проектировщиком проблему. Произвол же в постановке задачи не лучше произвола в выборе решения, как это отмечает Е. С. Вентцель [2].

Список литературы

1. Нарусбаев, А. А. Введение в теорию обоснования проектных решений / А. А. Нарусбаев. – Л. : Судостроение, 1975.
2. Вентцель, Е. С. Исследование операций / Е. С. Вентцель. – М. : Наука, 1964.

УДК 519.7

Дедков, В. К.

Оптимизация технического решения при проектировании системы / В. К. Дедков // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 2. – С. 40–43.

Дедков Виталий Кириллович
доктор технических наук, профессор,
научный сотрудник отдела безопасности
и нелинейного анализа,
Учреждение Российской академии наук,
Вычислительный центр
им. А. А. Дородницына РАН
119333, г. Москва, ул. Вавилова, 40.
8-495-135-61-95
E-mail: dedkov-33@rambler.ru

Аннотация. В статье рассматриваются принципы выбора оптимального решения при проектировании технической системы. В частности, рассмотрены принципы выбора оптимального решения на основе так называемого «умеренного риска», к которым относятся: принцип Байеса–Лапласа, принцип Гурвица и принцип Сэведжа, т.е. принцип минимакса последствий ошибочного решения.

Ключевые слова: принцип «минимакса», принцип «максимина», принцип «умеренного риска», принцип Байеса–Лапласа, принцип равной вероятности, принцип Гурвица, принцип Сэведжа.

V. Dedkov
doctor of technical science, professor, the scientific worker of the division of safety and nonlinear analysis the establishment of the Russian academy of sciences computer center A. A. Dorodnitsyn,
Russian academy of sciences
119333, Moscaw, Vavilova street, 40.
8-495-135-61-95
E-mail: dedkov-33@rambler.ru

Abstract. In article the principles of a choice of the optimum decision are considered at design of technical system. In particular the principles of a choice of the optimum decision on the basis of so-called «moderate risk» which treat are considered: Bayesa-Laplace's principle, Gurvits's principle and principle of Sevedzha, i.e. principle of a minimax of consequences of the wrong decision.

Key words: principle of «minimax», principle «maximine», principle of «moderate risk», Bayesa-Laplace's principle, principle of equal probability, Gurvits's principle, principle of Sevedzha.

УДК 681.51

К ПРОБЛЕМЕ ИДЕНТИФИЦИРУЕМОСТИ МОДЕЛЕЙ НЕЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ

И. С. Можаровский

Введение

Идентификация систем в теории управления – определение структуры системы и ее параметров путем анализа входных и выходных данных системы. В свою очередь, идентифицируемость – это не метод восстановления ее параметров, а такое же системное свойство, как управляемость и наблюдаемость, позволяющее построить адекватную модель на выбранных данных в заданных условиях [1].

На этапе синтеза систем управления на основе прогнозирующих моделей часто ставятся задачи построения новых, сложных моделей процессов, не имеющих априорного математического описания [2]. Одним из таких процессов является процесс массообмена в промышленной ректификационной колонне (РК). Для построения моделей таких процессов необходимо убедиться, что в заданных условиях (при ограниченности выборки в силу различных, как технических, так и временных обстоятельств) можно подобрать адекватную модель, т.е. удостовериться в ее идентифицируемости.

В статье предложена методика определения степени идентифицируемости моделей с помощью алгоритма ACE (Alternating conditional expectation – чередующееся условное математическое ожидание) [3, 4] и дополнительного входа. Представлены примеры, иллюстрирующие применение предлагаемого подхода.

Постановка задачи

Пусть нелинейная модель в общем виде описывается следующим уравнением:

$$Y = f(\mathbf{X}, \mathbf{u}, \mathbf{p}, \mathbf{d}), \tag{1}$$

где **X** – вектор состояний; **u** – внешние входные управляющие сигналы; **p** – вектор параметров; **d** – вектор измерений.

В работе рассматривается следующий класс нелинейных моделей:

$$Y = f(X_1, ..., X_n) = f_1(X_1) + f_2(X_2) + ... + f_n(X_n). \tag{2}$$

Для построения адекватной модели (1) в виде (2) могут использоваться алгоритмы, позволяющие представить нелинейную функцию как сумму нелинейных функций от каждого входа, например, алгоритм ACE [3, 4].

Ставится задача разработки методики определения идентифицируемости нелинейных моделей с применением алгоритма ACE и введением в модель дополнительного входа и исследования результатов ее использования при определении идентифицируемости моделей.

Принцип определения идентифицируемости исследуемой модели

Для определения степени идентифицируемости используется специально введенный в модель искусственный вход, содержащий случайные значения или как вариант – константу, никак не влияющий на выход. С помощью алгоритма ACE формируется оптимальное преобразование Φ для полученной выборки [3].

Оптимальное преобразование Φ включает функциональную зависимость $Y = F(X_i)$ для каждого X_i и случайные отклонения Δ, имеющие в среднем одинаковую амплитуду, величина которой обратно пропорциональна размеру выборки (числу измерений).

Разность между максимальным и минимальным значениями функции $F(X_i)$, которую восстанавливает соответствующее преобразование Φ тем больше, чем большую роль играет X_i в формировании **Y**, т.е. эта разность пропорциональна доле вклада данного X_i среди всех входов **X**. В случае неидентифицируемой модели **Y** от X_{un} не зависит, поэтому максимальное и минимальное значения $F(X_{un})$ не изменяются.

Таким образом, идентифицируемость каждого X_i можно оценить, разделив крайние значения Φ для X_i на крайние Φ для искусственного неидентифицированного X_{un}. Получающаяся величина:

$$iden = \frac{((F(X_i)_\max - F(X_i)_\min) + \Delta)}{\Delta}, \qquad (3)$$

где *iden* – это оценка идентифицируемости модели; $F(X_i)_\max$ – максимальное значение оптимального преобразования ACE для текущего входа; $F(X_i)_\min$ – минимальное значение оптимального преобразования ACE для текущего входа.

Значение *iden* будет тем больше, чем лучше идентифицируемость X_i и чем больше выборка, так как Δ уменьшается с увеличением размера выборки. В (3) величина Δ является отклонением текущего значения Φ для X_i от значения, которое должно получиться в идеальном случае. Его можно оценить из функциональной зависимости $F(X_i)$, предполагая, что данная зависимость известна, как в нашем искусственно заданном случае.

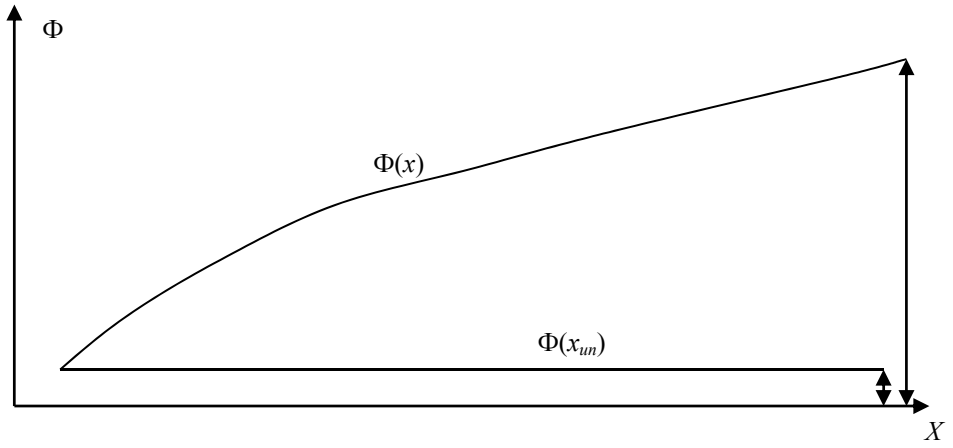


Рис. 1. Принцип определения идентифицируемости по алгоритму ACE

Из рис. 1 следует, что для неидентифицируемой модели весь диапазон значений в (3) определяется только ошибкой Δ и уменьшается с ростом количества измерений. Если же X_i влияет на **Y**, то он, будучи обусловленным разницей значений X_i, остается постоянным, а добавка, связанная со случайной ошибкой, уменьшается. Таким образом, показатель (3) будет увеличиваться с ростом числа измерений, а его величина будет указывать на степень идентифицируемости входа.

Подход к определению идентифицируемости исследуемой модели

Исходя из определения идентифицируемости модели можно сделать вывод, что при различных значениях входов в модель, в допустимом диапазоне для каждого входа существует определенная закономерность, посредством которой **X** преобразуется в **Y**. Она должна соблюдаться при любых допустимых значениях на входах в модель. На основе этого предлагается методика, позволяющая оценить идентифицируемость модели с помощью алгоритма ACE.

Шаг 1. К матрице данных (выборке) исследуемой модели присоединяем столбец со случайными значениями в диапазоне от 0 до 1 – априорно неидентифицируемый вход.

Шаг 2. Применяем алгоритм ACE к обновленной матрице данных для получения базового набора векторов оптимальных преобразований Ф по каждому входу исследуемой модели (с базовым набором векторов попарно сравниваются последующие вычисления *Шага 4*).

Шаг 3. В обновленной матрице данных модели к каждому столбцу добавляем случайное значение, имитирующее ошибки измерения и не изменяющее сути модели. Оно должно быть достаточно мало, чтобы практически не влиять на вид зависимости **Y** от **X**, например, в диапазоне [0,00:0,01].

Следует отметить, что добавление небольшого случайного значения делается с целью изменения результата работы алгоритма ACE по вычислению векторов оптимальных преобразований. Это связанно с тем, что преобразование ACE строится не по самим значениям *X*, а по их порядковым номерам в отсортированном массиве *X*. Поэтому достаточно поменять местами пару точек, чтобы алгоритм ACE изменил все точки результирующей кривой оптимального преобразования Ф.

Шаг 4. Применяем метод ACE к преобразованной матрице данных и получаем новый набор векторов оптимальных преобразований Ф.

Шаг 5. Вычисляем разность между результатами *Шага 2* для базового набора векторов и *Шага 4* для матрицы данных с малыми случайными вариациями значений входов и рассчитываем среднее значение квадратов отклонений преобразованной матрицы данных от базовой матрицы данных.

Шаг 6. Повторяем *Шаги 3–5* заданное число раз *N* для получения более точного усредненного результата и вычисляем среднее значение для каждого входа.

Шаг 7. Рассчитываем относительный вклад каждого входа в модель, нормированный на вклад неидентифицируемого входа по формуле

$$iden_{Xi} = \frac{mean_{Xnu}}{mean_{Xi}},$$

где $iden_{Xi}$ – оценка идентифицируемости модели по *i*-му входу; $mean_{Xnu}$ – среднее значение сумм разностей для неидентифицированного входа; $mean_{Xi}$ – среднее значение сумм разностей для текущего входа.

Шаг 8. Вычисляем среднее отклонение и средний вклад каждого входа в модель.

Пример 1

Для иллюстрации подхода определения идентифицируемости рассмотрим модель со сложной нелинейной структурой. Пусть модель имеет вид

$$Y = X1^2 + \sin(X2*3) + (X3+3) + \log(X4) \tag{4}$$

Возьмем достаточно большое число измерений N = 1000 для более точного определения модели. Входы в модель имеют следующий диапазон значений: $X1$ [–2,5:2,5]; $X2$ и $X3$ [0:1]; $X4$ [0:2]. После определения матрицы данных (5 × 1000) добавим дополнительный вход со стохастическими значениями в диапазоне $X5$ [0:1], некоррелирующие с выходом. Добавим к каждому значению выборки случайное значение *xerr* [0:0,009]. Применим алгоритм ACE и получим базовую оценку модели, набор векторов ACE преобразований Ф (рис. 2).

Проанализируем сформированную выборку с помощью коэффициентов корреляции табл. 1. Полученные коэффициенты корреляции не дают какого-либо определенного ответа о структуре данных. Наибольшее значение 0,3866 дал вход $X4$ (функция логарифма), но и оно мало. Остальные коэффициенты корреляции показывают неопределенность. В свою очередь алгоритм ACE находит структуру выборки достаточно точно (параболу, синусоиду, прямую, логарифмическую кривую) (см. рис. 2).

Таблица 1

Коэффициенты корреляции выборки примера 1

Y	$X1$	$X2$	$X3$	$X4$	$X5$
1,0000	0,0507	–0,0042	0,2665	0,3866	0,0167

Также полученную выборку исследовали на корреляционное отношение (табл. 2). Корреляционное отношение определило хорошее влияние входа *X*1, равное 0,6734, что указывает на влияние данного входа на выход, но значения корреляционных отношений остальных входов не дают определенного понимания структуры данных.

Таблица 2

Корреляционное отношение выборки примера 1

Y	*X*1	*X*2	*X*3	*X*4	*X*5
–	0,7621	0,2703	0,3119	0,3982	0,1148

Анализ выборки средствами корреляционного отношения и коэффициентов регрессии дал неопределенные результаты о возможной идентифицируемости модели.

Для оценки идентифицируемости применим наш подход, проведем 20 итераций сравнения оценок модели с базовыми оценками модели (рис. 3). 20 расчетов необходимо для того, чтобы получить среднее значение отклонения.

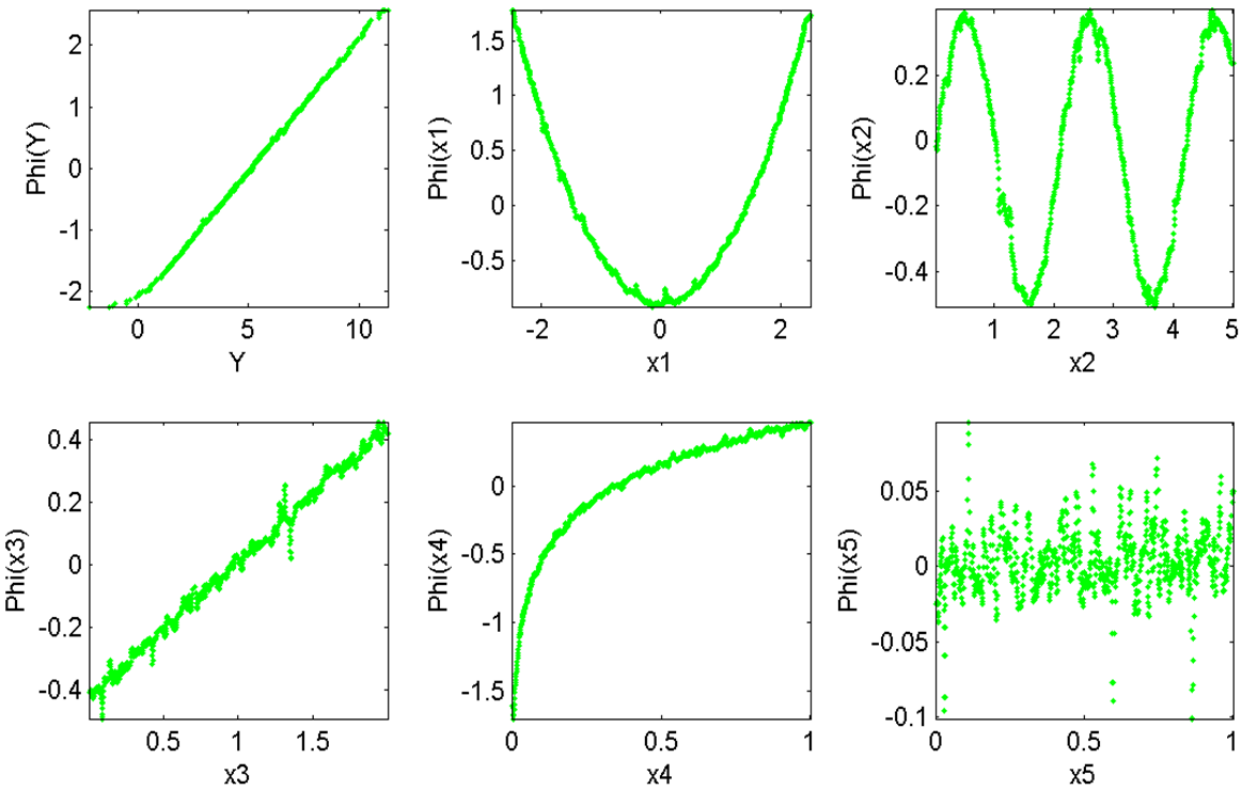


Рис. 2. Базовая матрица данных после применения алгоритма ACE

Таблица 3

Результаты применения подхода

Параметр	*Y*	*X*1	*X*2	*X*3	*X*4	*X*5
mean	0,032	0,043	0,107	0,132	0,113	1,45
iden	45,65	33,76	13,59	10,95	12,83	1,0000

Результатом подхода является *mean* – средняя сумма расстояний между точками базовой оценки модели от текущей оценки модели для каждого параметра (табл. 3). Значение входа *X*5 по параметру *mean* равно 1,45, что соответствует неидентифицируемости входа. Показатели значения *mean* на данном примере полностью подтверждают условия существования исследуемой модели и указывают на идентифицируемость модели.

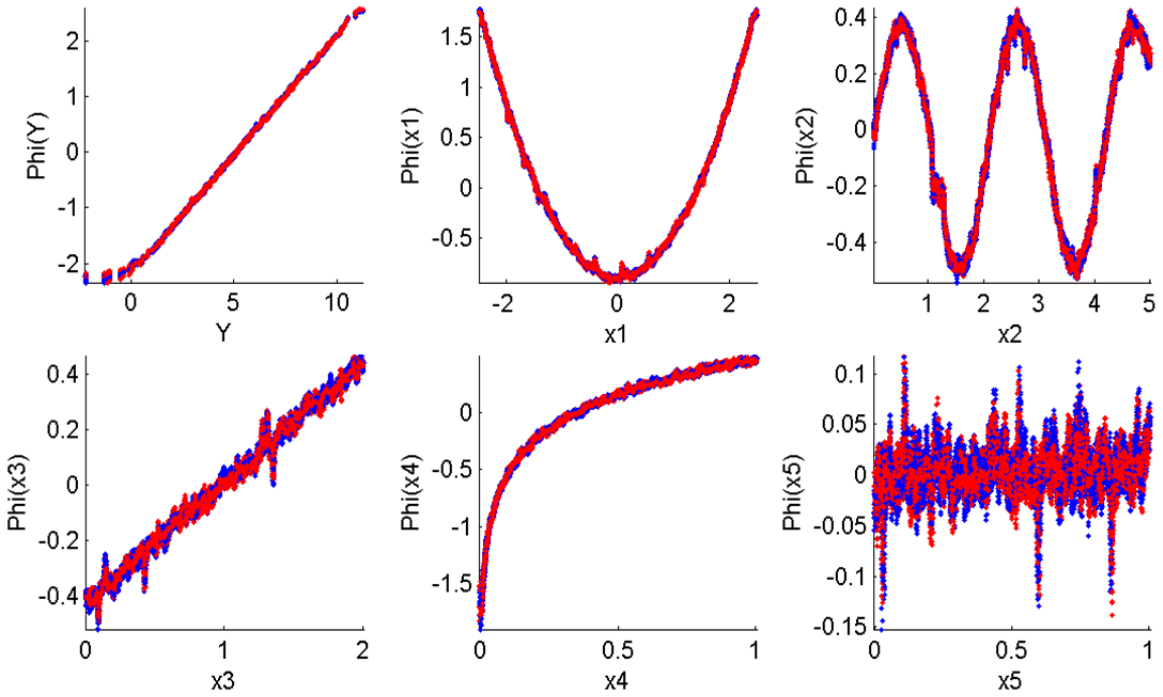


Рис. 3. Преобразованная матрица данных после применения алгоритма ACE (20 итераций)

Значения *mean* отражают устойчивость кривых: чем меньше значения, тем выше статистическая определенность функциональной связи входов. Если последняя колонка априорно абсолютно неидентифицируемая, то степень идентифицируемости можно определить сравнением остальных входов с этим искусственным входом. Строка *iden* получена из строки *mean*, где обратные значения *mean* нормированы на значение 5-й колонки.

Значение *iden* отображает вклад каждого параметра модели в отношении с априорно неидентифицируемым параметром (дополнительным входом). В рассмотренном примере можно отметить, что вход $X1$ имеет наибольший вклад в модель, а вход $X3$ – наименьший, т.е. подтверждается предположение (4).

Пример 2

Для оценки идентифицируемости модели в предыдущем примере мы использовали сложную нелинейную структуру модели. Для того чтобы показать, что подход работает верно, предлагаем рассмотреть пример с совершенно неидентифицируемыми данными.

Для этого построим хаотичную матрицу данных (5x1000), где Y равен случайному значению в диапазоне [0:100]; входы в модель также не связаны между собой и равны случайному значению в соответствующих диапазонах для каждого входа: $X1$ [–2,5:2,5]; $X2$ [0:5]; $X3$ [0:2]; $X4$ [0:1].

Проанализируем сформированную выборку с помощью коэффициентов корреляции (табл. 4), а также с помощью корреляционного отношения (табл. 5). Полученные результаты однозначно указывают на то, что никаких взаимосвязей в данных нет, что полностью подтверждает неидентифицируемость модели.

Таблица 4

Коэффициенты корреляции выборки примера 2

Y	$X1$	$X2$	$X3$	$X4$	$X5$
1,0000	0,0114	–0,0107	–0,0259	–0,0281	0,0135

Таблица 5

Корреляционное отношение выборки примера 2

Y	$X1$	$X2$	$X3$	$X4$	$X5$
–	0,0328	0,0921	0,0832	0,1051	0,0907

Применим разработанный подход определения идентифицируемости, получим рис. 4, 5 и табл. 6.

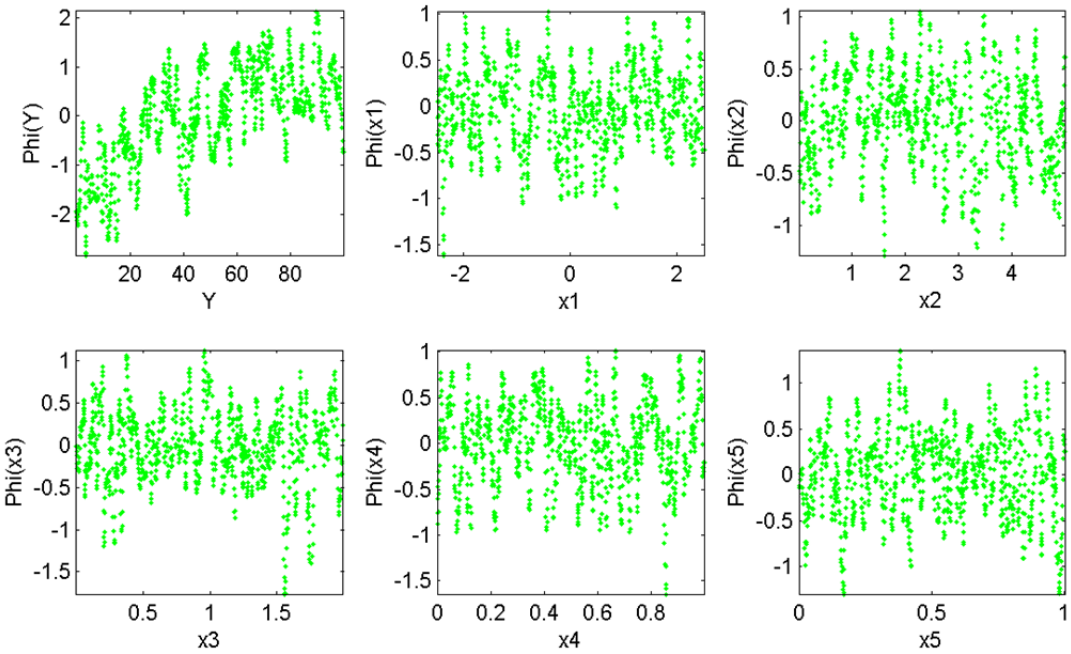


Рис. 4. Базовая матрица данных после применения алгоритма ACE

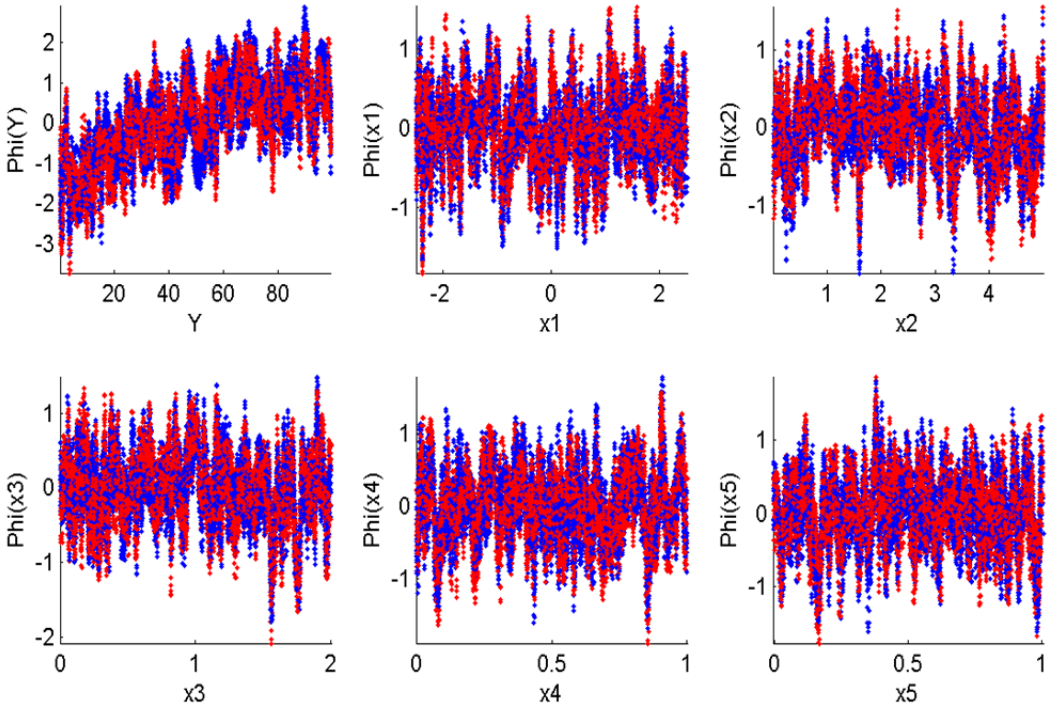


Рис. 5. Преобразованная матрица данных после применения алгоритма ACE (20 итераций)

Таблица 6

Результаты применения подхода

Параметр	*Y*	*X*1	*X*2	*X*3	*X*4	*X*5
mean	0,98	1,29	1,18	1,27	1,43	1,34
iden	1,38	1,04	1,14	1,06	0,94	1,00

Проведенные исследования показывают, что в исследуемой модели нет связей, этот факт определен по значению *mean* (см. табл. 6). Если *mean* близок к 1, то данные не имеют зависимостей, а модель неидентифицируема.

Выводы

Создана методика определения идентифицируемости моделей на основе алгоритма ACE и дополнительного входа. Методика проверена на различных моделях [4–7]. Предложенная методика применена для определения идентифицируемости моделей различных нелинейных процессов. Разработанная методика дает возможность определять идентифицируемость модели в заданных условиях при различных выборках данных, показывает относительный вес каждого предиктора относительно друг друга, определяет вес отклика относительно предикторов, определяет информативные или слабо информативные входы. Данная методика позволяет быстро, надежно, просто и наглядно оценить идентифицируемость модели, построенной на выборке достаточного объема.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов ДВО РАН № 12-I-П17-02 и № 12-I ОЭММПУ-04 и гранта ДВО-РФФИ № 11-08-98500-р_восток_а.

Список литературы

1. Балонин, Н. А. Б 20 Новый курс теории управления движением / Н. А. Балонин. – СПб. : Изд-во СПб ун-та, 2000. – 160 с.
2. Wang, D. Estimating optimal transformations for multiple regression using the ACE algorithm / D. Wang, M. Murphy // Journal of Data Science. – 2004. – V. 2. – P. 329–346.
3. Breiman, L. Estimating Optimal Transformations for Multiple Regression and Correlation / L. Breiman, J. H. Friedman // J. Amer. Statist. Assoc. – 1985. – P. 580–588.
4. Data-based identifiability analysis of non-linear dynamical models / S. Hengl, C. Kreutz, J. Timmer, T. Maiwald. // Bioinformatics. – 2007. – V. 23, № 19. – P. 2612–2618.
5. Разработка моделей показателей качества ректификационных колонн, функционирующих в предельных режимах / А. Ю. Торгашов, Г. Б. Диго, Н. Б. Диго, И. С. Можаровский // Идентификация систем и задачи управления (SICPRO'12) : тр. IX Междунар. конф. – М. : Ин-т проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2012.
6. Исследование методов идентификации моделей виртуальных анализаторов показателей качества ректификационной колонны / Г. Б. Диго, Н. Б. Диго, И. С. Можаровский, А. Ю. Торгашов // Фундаментальные и прикладные вопросы механики и процессов управления : сб. докладов Всерос. науч. конф., посв. 75-летию со дня рождения акад. В. П. Мясникова (г. Владивосток, 11–17 сентября 2011 г.) [Электронный документ]. – Владивосток : ИАПУ ДВО РАН, 2011. – С. 412–418.
7. Исследование моделей виртуальных анализаторов массообменного технологического процесса ректификации / Г. Б. Диго, Н. Б. Диго, И. С. Можаровский, А. Ю. Торгашов // Информатика и системы управления. – 2011. – № 4 (30). – С. 17–27.

УДК 681.51
Можаровский И. С.
К проблеме идентифицируемости моделей нелинейных объектов управления / И. С. Можаровский // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 2. – С. 44–50.

Можаровский Игорь Сергеевич
аспирант,
институт автоматики
и процессов управления ДВО РАН
690041, г. Владивосток, пр. Радио, д. 5.
E-mail: mozharovskiy@iacp.dvo.ru

Аннотация. Рассматривается методика определения идентифицируемости нелинейных объектов систем управления на основе прогнозирующих моделей с использованием алгоритма чередующегося условного математического ожидания и дополнительного входа.

Ключевые слова: модель; выборка данных; идентифицируемость; нелинейность; алгоритм.

I. Mozharovsky
institute of Automation and management of FEB RAS
690041, Vladivostok, the Radio 5.
E-mail: mozharovskiy@iacp.dvo.ru

Abstract. Discussed method based on the ACE algorithm for determining the identifiability of models formed on samples with a complex nonlinear data structure.

Key words: model; data; identifiability; nonlinear; algorithm.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

УДК 004.932.2

ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЭТАЛОНОВ ТРЕХМЕРНЫХ ОБЬЕКТОВ ДЛЯ ИХ РАСПОЗНАВАНИЯ

С. С. Садыков

С середины прошлого века в различных отраслях при автоматизации производственных процессов началось использование систем технического зрения (СТЗ). В основном они имеют в своем составе один видеодатчик [1–3]. Недостатком таких систем является необходимость жесткой фиксации объекта в поле зрения датчика. Это условие накладывает существенные ограничения на классы распознаваемых объектов (они должны быть однотипными, иметь сходные размеры и т.д.). Поэтому возникает необходимость построения СТЗ с двумя и большим числом видеодатчиков, обладающих более широкими возможностями.

Характеристики подсистемы распознавания трехмерных объектов во многом зависят от правильно выбранного набора признаков для эталона. Поэтому задача формирования набора признаков распознаваемых объектов для эталона является актуальной.

Статья посвящена описанию технологии формирования многопараметрических эталонов распознаваемых трехмерных объектов в СТЗ с двумя видеодатчиками.

Общая схема формирования эталонов представлена на рис. 1.

Рис. 1. Схема формирования эталонов:
1 – объект; 2 – два видеодатчика; 3 – два изображения объекта, полученные сверху и сбоку;
4 – этап предварительной обработки; 5 – этап выделения признаков;
6 – этап формирования эталона; 7 – сохранение эталона в базе эталонов

Этап получения цифровых изображений объекта

С помощью двух видеодатчиков формируются два изображения объекта, снятые сверху и сбоку, и размещаются в памяти.

Этап предварительной обработки

Схема предварительной обработки представлена на рис. 2.

Рис. 2. Схема предварительной обработки:
1 – два изображения объекта; 2, 3 – блоки фильтрации и сглаживания помех;
4 – блок повышения контраста; 5 – блок сегментации (бинаризации);
6 – блок приведения изображения к стандартному положению; 7 – два бинарных изображения объекта

Блоки 2, 3, 4, 5 реализованы на основе алгоритмов, приведенных в [4].

Какие положения объекта в поле зрения камеры видеодатчика являются стандартными, устанавливается разработчиком системы.

При произвольном расположении объекта его бинарное изображение приводится к стандартному виду с использованием алгоритмов, приведенных в [5].

Этап выделения признаков

Схема выделения признаков представлена на рис. 3.

Рис. 3. Схема выделения признаков:
1 – два стандартных бинарных изображения объекта; 2 – блок выделение контуров;
3 – блок определения наличия отверстий в объекте, 4 – блок вычисления коэффициента формы объекта;
5 – битовая маска изображения объекта; 6 – блок расчета инвариантных моментов;
7 – блок расчета автокорреляционной функции контура;
8 – блок вычисления характеристик объекта; 9 – набор признаков объекта

Выделение контура осуществляется на основе алгоритма, приведенного в [6, 7].

Определение наличия отверстий производится на базе алгоритма в [8].

Вычисление коэффициента формы основано на определении отношения длины на ширину объекта. Коэффициент формы вычисляется на изображении, полученном с верхней камеры.

Расчет битовой маски изображения проводится в соответствии с алгоритмом, описанным в [9].

Вычисление инвариантных моментов контуров осуществляется с использованием алгоритма в [9].

Расчет автокорреляционной функции контуров производится на основе алгоритмов [7].

При наличии поворота объекта относительно осей координат вертикальной камеры боковая проекция может содержать в себе данные двух видимых сторон объекта, что может привести к ошибкам распознавания. Для решения данной проблемы было предложено рассчитывать коэффициент «видимости боковой проекции».

По проекции главного вида определяются ширина и длина объекта, а также угол его наклона. С их помощью находятся коэффициенты видимости смежных сторон на боковой проекции.

Коэффициент видимости меньшей стороны на боковой проекции (отсекается менее видимая часть):

$$k_l = \frac{L_{mp}}{L_{sp}}, \tag{1}$$

где L_{mp} – количество пикселей ширины на виде «сверху»; L_{sp} – количество пикселей ширины на виде «слева».

Коэффициент видимости большей стороны на боковой проекции (отсекается менее видимая часть):

$$k_h = \frac{H_{mp}}{H_{sp}}, \tag{2}$$

где H_{mp} – количество пикселей длины на виде «сверху»; H_{sp} – количество пикселей длины на виде «слева».

1. Если объект по длинной стороне находится ближе к горизонтальной оси координат (0–45°) (135°–180°), т.е. $k_l > k_h$, то на боковой проекции отсекается видимая часть на рассматриваемой проекции, растягивается до полной длины объекта (применяются аффинные преобразования «растягивание» [5]) (рис. 4).

2. Если объект по длинной стороне находится ближе к вертикальной плоскости оси координат (45°–90°, 90°–135°), т.е. $k_l < k_h$, то на боковой проекции отсекается видимая часть не рассматриваемой проекции, растягивается до полной ширины объекта (применяются аффинные преобразования «растягивание» [5]) (рис. 5).

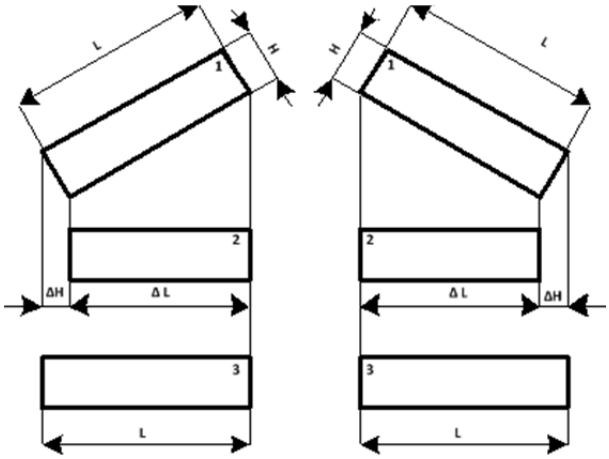


Рис. 4. Иллюстрация ситуации, когда на боковой проекции максимально видна бóльшая сторона объекта: L, H – длина и ширина объекта на виде «сверху»; ΔH, ΔL – значения величин ширины и длины объекта, видимых на проекции «слева»; 1 – изображение объекта на виде «сверху»; 2 – изображение объекта на виде «слева»; 3 – «вытянутое» и «обрезанное» изображение проекции вида «слева»

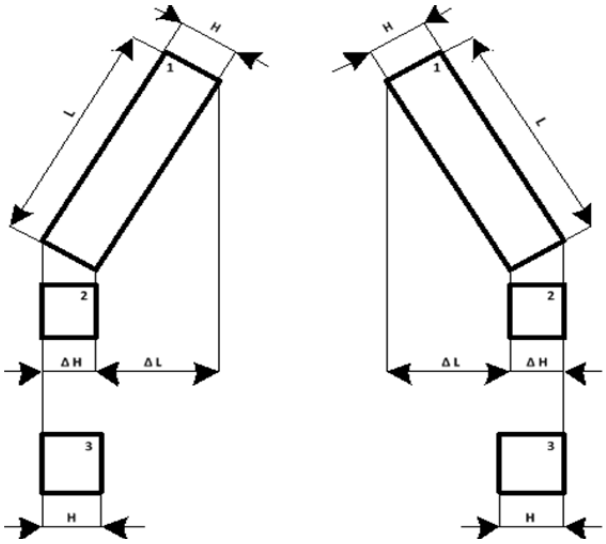


Рис. 5. Иллюстрация ситуации, когда на боковой проекции максимально видна меньшая сторона объекта: L, H – длина и ширина объекта на виде «сверху»; ΔH, ΔL – значения величин ширины и длины объекта, видимых на проекции «слева»; 1 – изображение объекта на виде «сверху»; 2 – изображение объекта на виде «слева», 3 – «вытянутое» и «обрезанное» изображение проекции вида «слева»

Этап выделения признаков

Набор признаков, необходимый для классификации и распознавания:
1) коэффициент формы;
2) битовая маска изображения объекта (признак, характеризующий структуру объекта);
3) инвариантные моменты;
4) автокорреляционная функция;
5) характеристики отверстий.

Коэффициент формы. Коэффициент формы вычисляется по формуле

$$r = \frac{b}{a}, \tag{3}$$

где r – коэффициент формы; a – длина объекта; b – ширина объекта.

Битовая маска изображения объекта. Оригинальное изображение содержит много деталей. Чтобы описать структуру изображения объекта необходимо избавиться от лишних деталей. Уменьшенная копия изображения позволяет оставить данные только о структуре объекта, удаляя детали изображения.

Алгоритм расчета битовой маски следующий:

1. Изображение вписывается в центр квадратной области размером $L \times L$, где L – длина объекта (рис. 6).

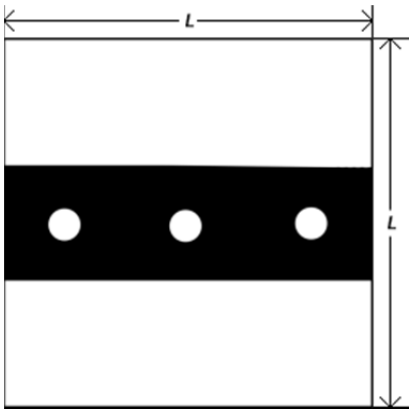


Рис. 6. Изображение объекта вписанного в квадратную область

2. Изображение уменьшается в соответствии с алгоритмом, представленным в [5] (рис. 7). В данном случае оно уменьшается до 8 × 8. Размер уменьшенного изображения выбран таким образом, чтобы общее количество пикселей было равно 64, что соответствует одному целому значению двухбайтного числа.

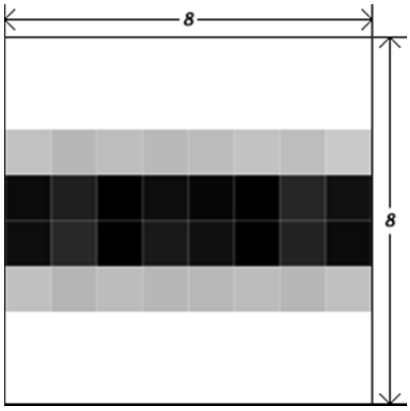


Рис. 7. Результат алгоритма уменьшения изображения до размера 8 × 8 пикселей

3. Вычисляется среднее значение яркости этого изображения и проводится пороговое преобразование по алгоритму, представленному в [4] (рис. 8).

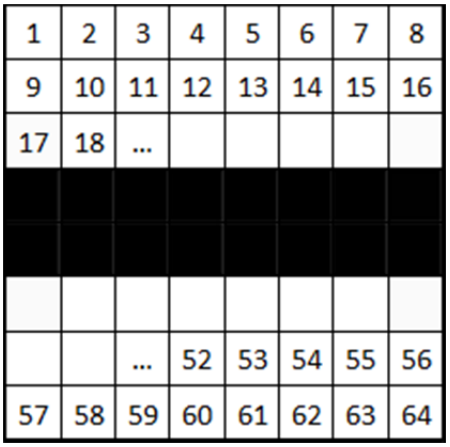


Рис. 8. Бинарное изображение с указанием последовательности считывания цепочки битов (порог бинаризации выбран по среднему значению яркости)

Бинарное уменьшенное изображение объекта представляет собой битовую матрицу 8×8 элементов. На рис. 8 цифрами показана нумерация битов.

4. На основе битовой матрицы выстраивается цепочка битов слева направо, сверху вниз (как показано на рис. 8). Для каждого белого пикселя бит равен 1, для каждого черного – 0:

11111111111111111111111100000000 00000000111111111111111111111111

5. Битовая цепочка преобразуется в одно 64-битное целое число. Оно представляется в 16-ричном формате. Для данного примера оно выглядит следующим образом:

ffffff 0000 *ffffff*

Это число описывает структуру объекта.

Инвариантные моменты. Инвариантные моменты являются линейными комбинациями центральных моментов. Идея заключается в том, что комбинируя различные нормированные центральные моменты можно создать инвариантные функции, представляющие различные аспекты изображения таким образом, что они будут инвариантны для масштабирования, вращения и (для всех, кроме h_1) отражения.

Инвариантные моменты представляются семью вещественными значениями h_i, где $i = 1, 2, \ldots, 7$, расчет которых представлен в [8].

Автокорреляционная функция (АКФ). АКФ – это скалярное произведение контура на самого себя при различных сдвигах начальной точки:

$$A(m) = \left(\mathrm{K}, \mathrm{K}^{(m)}\right), \tag{4}$$

где A – АКФ, $m = 0, 1, \ldots, k-1$ – сдвиг начального элементарного вектора, К – контур объекта. Подробное описание алгоритма АКФ представлено в [9].

Характеристики отверстий. Отверстие относительно объекта характеризуется следующими значениями:

1) угол между вектором, соединяющим центры масс объекта и отверстия с горизонтальной осью;

2) отношение площади отверстия к площади объекта;

3) отношение расстояния между центрами масс объекта и отверстия к расстоянию от центра масс до края контура.

Схематично это изображено на рис. 9.

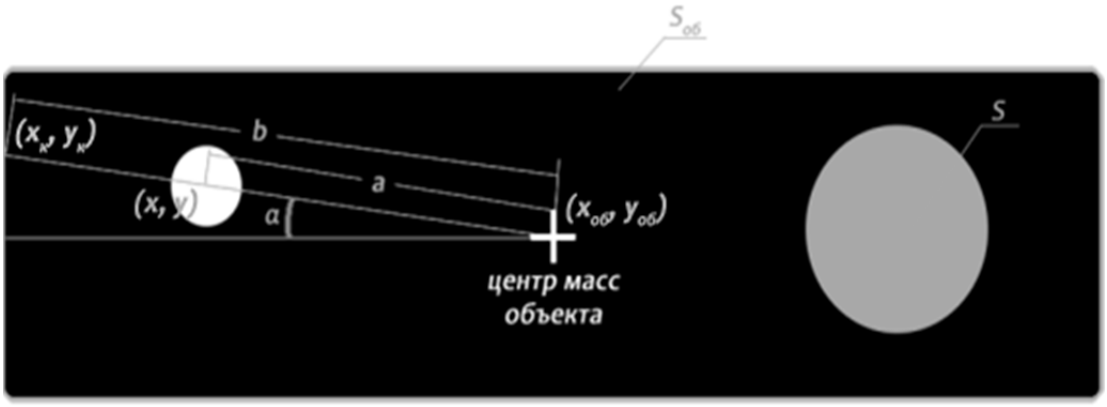


Рис. 9. Схематическое отображение отверстий

Расчет характеристик отверстий требует наличия следующих изображений и величин:

1) контур объекта (представленный массивом элементарных векторов);

2) контур отверстия (представленный массивом элементарных векторов);

3) центр масс объекта $(x_{об}, y_{об})$;

4) центр масс отверстия (x, y).

Угол находится по следующей формуле:

$$\alpha_x = \operatorname{arctg}\left(\frac{y_{об} - y}{x_{об} - x}\right). \tag{5}$$

Площадь равна количеству точек, лежащих внутри контура. После того как будут найдены площади самого отверстия и объекта, то применяется следующая формула для составления характеристики отверстия:

$$S_x = \frac{S}{S_{об}}. \tag{6}$$

где S – площадь отверстия; $S_{об}$ – площадь объекта.

Значение площади характеризуется в процентах от общей площади объекта.

Третья характеристика, а именно, расстояние между центрами масс, вычисляется с помощью следующей формулы:

$$l_x = \frac{a}{b}, \tag{7}$$

где $a = \sqrt{(x_{об} - x)^2 + (y_{об} - y)^2}$; $b = \sqrt{(x_{об} - x_к)^2 + (y_{об} - y_к)^2}$.

Координаты $x_к$ и $y_к$ в предыдущей формуле – это точки пересечения линии контура и линии, проходящей через центр масс объекта и отверстия.

С учетом вышеописанного проекция объекта будет описываться следующим вектором признаков:

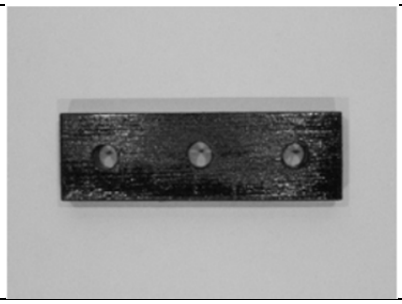
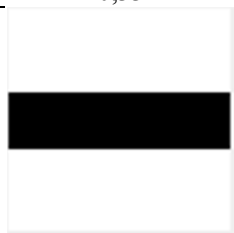
$$W = \{k_{wh}, H, M(C), A(C), O\}, \tag{8}$$

где k_{wh} – коэффициент формы объекта; H – битовая маска изображения объекта; $M(C)$ – моменты контура объекта; $A(C)$ – АКФ контура объекта; O – вектор признаков отверстий, $O = \{\alpha_x, S_x, l_x\}$.

Для проверки предложенной технологии было разработано тестовое приложение, результаты его работы приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты работы тестового приложения для нахождения характеристик объекта

Наименование признака		
Коэффициент формы	0,33	0,33
Битовая маска изображения объекта	 *ffffff* 0000 *ffffff*	*ffffff* 0000 *ffffff*
Инвариантные моменты	$h_1 = 0,281091748852738$ $h_2 = 0,0507827602854608$ $h_3 = 0,00167856087485477$ $h_4 = 0,000144921247242696$ $h_5 = -7,09949923418601 \cdot 10^{-8}$ $h_6 = -3,25266334172138 \cdot 10^{-5}$ $h_7 = 8,28735610007766 \cdot 10^{-9}$	$h_1 = 0,280876798093335$ $h_2 = 0,0506545902751358$ $h_3 = 0,00167971395492243$ $h_4 = 0,000145022295348231$ $h_5 = -7,11852133915004 \cdot 10^{-8}$ $h_6 = -3,2533788769945 \cdot 10^{-5}$ $h_7 = 7,47300876943902 \cdot 10^{-9}$
Признаки отверстий	{3,194 рад, 0,023, 0,674} {3,911 рад, 0,022, 0,05} {0,12 рад, 0,024, 0,67}	{3,195 рад, 0,022, 0,673} {3,913 рад, 0,021, 0,05} {0,124 рад, 0,021, 0,67}

Соотношение длины и ширины объекта на изображении позволит сделать первое отсеивание предположительных эталонов объекта по геометрическому признаку.

Критерием отбора эталонов по битовой маске является значение данного числа, т.е. если его значение у исследуемого объекта совпадает со значением данного признака эталона, то исследуемый объект вполне может быть этим эталоном, иначе это совсем разные объекты, и этот эталон можно не брать в расчет. Данная характеристика объекта позволяет обеспечить системе независимость от масштаба объекта.

Применение инвариантных моментов и автокорреляционной функции контура позволяет сократить влияние поворота объекта в поле зрения камеры на точность распознавания.

Расположение отверстий на каждом объекте уникально, соответственно обнаружение отверстий позволит однозначно описать внутреннюю структуру объекта.

Предложенную технологию можно применять для расчета характеристик любых проекций объекта. При этом эталон объекта можно представить как совокупность векторов признаков из формулы (8) для каждой проекции объекта.

Список литературы

1. Системы технического зрения // Omron-russia.com : сайт. – М., 2011. – URL: http://www.omron-russia.com/documentation/vision/vision_brochure.pdf
2. Системы машинного зрения. Системы технического зрения: видеодатчики и камеры машинного зрения // Sick-automation.ru : сайт. – М., 2011. – URL: http://www.sick-automation.ru/catalog/sensors/complex/sensor_video.html#1

3. 3D-камеры IFM Electronic серии O3D2 // Sensoren.ru : сайт. – М., 2011. – URL: http://www.sensoren.ru/3d_kameri_ifm_electronic_serii_o3d2.html
4. Садыков, С. С. Предварительная обработка изображений плоских объектов в системах технического зрения / С. С. Садыков, С. В. Савичева // Приборостроение. – 2012. – № 2. – С. 19–24.
5. Bradski, G. Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library / Gary Bradski, Adrian Kaehle // O'Really Media. – 2008. – 556 с.
6. Upgrade Viola Jones // Habrahabr.ru : сайт. – 2011. – URL: http://habrahabr.ru/post/133909/
7. Контурный анализ // Habrahabr.ru : сайт. – 2011. – URL: http://habrahabr.ru/post/118486/
8. Моменты в OpenCV // Recog.ru : сайт. – 2011. – URL: http://recog.ru/blog/opencv/11.html
9. «Выглядит похоже». Как работает перцептивный хэш // Habrahabr.ru : сайт. – 2011. – URL:http://habrahabr.ru/post/120562/

УДК 004.932.2

Садыков, С. С.

Технология формирования эталонов трехмерных объектов для их распознавания / С. С. Садыков // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 2. – С. 51–58.

Садыков Султан Садыкович
доктор техничкеских наук, профессор,
Муромский институт (филиал)
Владимирского государственного университета,
602264, г. Муром, Владимирская обл.,
ул. Орловская, 23.
E-mail: sadykovss@yandex.ru

S. Sadykov
doctor of technical science, professor,
Murom Institute (Branch) of Vladimir State University
602264, Murom, Vladimirskaya reg., Orlovskaja street, 23.
E-mail: sadykovss@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрены этапы формирования эталонов для объектов в 3D СТЗ, описана структура базы данных для их хранения, представлены составные части эталона.

Abstract. The stages of the formation of new etalons for objects in 3D STZ, described the structure of the database to store them, are an integral part of the standard.

Ключевые слова: СТЗ, распознавание объектов, формирование эталонов.

Key words: STZ, object recognition, formation of thiscleon.

УДК 005.8

К ПРОБЛЕМЕ СИСТЕМНО-ПРОЦЕССНОГО ПОДХОДА В УПРАВЛЕНИИ СЛОЖНЫМ НАУКОЕМКИМ ПРЕДПРИЯТИЕМ

К. С. Петелин

В условиях динамичности современного производства и общественного устройства управление должно находиться в состоянии непрерывного развития, которое сегодня невозможно обеспечить без исследования путей и возможностей этого развития, без выбора альтернативных направлений. Исследование управления осуществляется в каждодневной деятельности экспертов в данной области и в работе специализированных аналитических групп, лабораторий, отделов. Необходимость в исследованиях систем управления продиктована достаточно большим кругом проблем, с которыми приходится сталкиваться многим предприятиям, и от правильных решений которых зависит успех их работы.

Отдельно следует выделить проблемы управления научными проектами. Специфической чертой научных проектов являются: некоммерческая направленность; неопределенность результатов; продолжительные сроки реализации; трудность оценки как прогнозируемых и планируемых, так и фактических результатов реализации проектов; необходимость комплексного охвата предметных областей и организации информационного обмена; отсутствие аналогий в ретроспективе; узкая специализация участников, что накладывает соответствующие требования на механизмы управления [1].

Решение этих проблем невозможно без применения необходимых мер, что делает этот вопрос актуальным и сейчас.

Сегодня состояние производственной и научной деятельности на промышленных предприятиях во многом определяется несовершенством и еще недостаточно высоким уровнем организации управления во всех сферах и на всех уровнях научной и производственной деятельности. В этой ситуации исключительно важное значение приобретает формирование эффективных управленческих стратегий функционирования, которые обеспечивают успех в конкурентной борьбе и устойчивое положение на рынке.

Проблемы управления проектами не являются новыми. В различные эпохи, особенно в последнее столетие, в разных странах приходилось с той или иной степенью успеха реализовывать различные проекты. Определенный опыт в этой области был накоплен и в Российской Федерации, где осуществлялось большое число крупномасштабных проектов. Однако необходимо иметь в виду, что применявшиеся в условиях существовавшей командно-административной системы методы и принципы управления не могут быть востребованы в условиях настоящей рыночной экономики. В современном обществе в связи со значительным усложнением проблем и ростом их масштабов методология управления проектами получила новый стимул для своего развития. Потребовались новые подходы к управлению проектами на основе новых принципов и методов. Новая методология управления проектами представляет собой эффективный инструмент для решения многих важных задач [2].

Системно-процессное управление – современное развивающееся направление теории менеджмента и теории организации, основывающееся на общей теории систем, теории информации, кибернетике, нелинейной динамике. Системно-процессный подход включает в себя основные утверждения системного подхода, в котором управление основывается на том, что всякая организация представляет собой систему, состоящую из частей, каждая из которых обладает своими собственными целями, и процессного подхода, где управление рассматривается как процесс – серия взаимосвязанных непрерывных действий. Другими словами, системно-процессный подход включает в себя понятия системного подхода, требующего соответственно системного мышления, и процессного подхода, которые в принципе неразделимы, так как никаких «систем» без созидающих их «процессов» быть не может [1].

Системный подход – это подход, при котором любая система (объект) рассматривается как совокупность взаимосвязанных элементов (компонентов), имеющая выход (цель), вход (ресурсы), связь с внешней средой, обратную связь. Его сущность состоит в реализации требований общей теории систем, согласно которой каждый объект в процессе его исследования должен рассматриваться как большая и сложная система и одновременно как элемент более общей системы.

Развернутое определение системного подхода включает также обязательность изучения и практического использования следующих восьми его аспектов:

– системно-элементного или системно-комплексного, состоящего в выявлении элементов, составляющих данную систему. Во всех социальных системах можно обнаружить вещные компоненты (средства производства и предметы потребления), процессы (экономические, социальные, политические, духовные и т. д.) и идеи (научно-осознанные интересы людей и их общностей);

– системно-структурного, заключающегося в выяснении внутренних связей и зависимостей между элементами данной системы и позволяющего получить представление о внутренней организации (строении) исследуемой системы;

– системно-функционального, предполагающего выявление функций, для выполнения которых созданы и существуют соответствующие системы;

– системно-целевого, означающего необходимость научного определения целей и подцелей системы, их взаимной увязки между собой;

– системно-ресурсного, заключающегося в тщательном выявлении ресурсов, требующихся для функционирования системы, для решения системой той или иной проблемы;

– системно-интеграционного, состоящего в определении совокупности качественных свойств системы, обеспечивающих ее целостность и особенность;

– системно-коммуникационного, означающего необходимость выявления внешних связей данной системы с другими, т.е. ее связей с окружающей средой;

– системно-исторического, позволяющего выяснить условия во времени возникновения исследуемой системы, пройденные ею этапы, современное состояние, а также возможные перспективы развития [3].

Системный подход предполагает исследование объекта (проблемы, явления, процесса) как системы, в которой выделены элементы, внутренние и внешние связи, наиболее существенным образом влияющие на исследуемые результаты его функционирования, а цели каждого из элементов определены исходя из общего предназначения объекта (рис. 1).

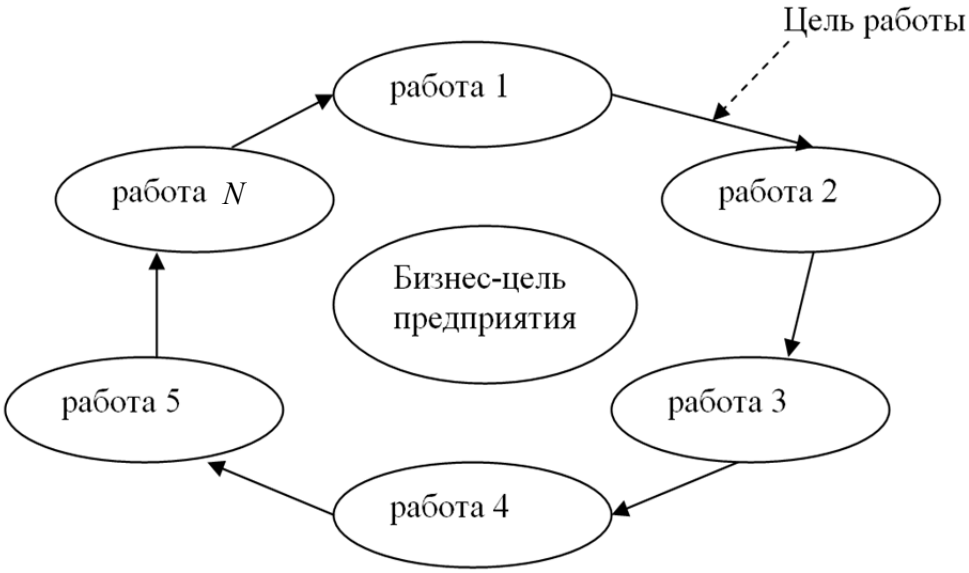


Рис. 1. Простейшая схема системного подхода в управлении

В наиболее общем виде под системой понимается совокупность взаимосвязанных элементов, образующих определенную целостность, некоторое единство.

Основными принципами системного подхода (системного анализа) являются:

1) целостность, позволяющая рассматривать одновременно систему как единое целое и в то же время как подсистему для вышестоящих уровней;

2) иерархичность строения, т.е. наличие множества (по крайней мере двух) элементов, расположенных на основе подчинения элементов низшего уровня элементам высшего уровня. Реализация этого принципа хорошо видна на примере любой конкретной организации. Как известно, любая организация представляет собой взаимодействие двух подсистем: управляющей и управляемой. Одна из них подчиняется другой;

3) структуризация, позволяющая анализировать элементы системы и их взаимосвязи в рамках конкретной организационной структуры. Как правило, процесс функционирования системы обусловлен не столько свойствами ее отдельных элементов, сколько свойствами самой структуры;

4) множественность, позволяющая использовать множество кибернетических, экономических и математических моделей для описания отдельных элементов и системы в целом [4].

Практически все современные науки построены по системному принципу. Важным аспектом системного подхода является выработка нового принципа его использования – создание нового, единого и более оптимального подхода (общей методологии) к познанию, для применения его к любому познаваемому материалу с гарантированной целью получить более полное и целостное представление об этом материале.

Таким образом, системный подход позволяет нам комплексно оценить любую производственную и хозяйственную деятельность и деятельность системы управления на уровне конкретных характеристик. Это поможет анализировать любую ситуацию в пределах отдельно взятой системы, выявить характер проблем входа, процесса и выхода. Применение системного подхода позволяет наилучшим образом организовать процесс принятия решений на всех уровнях в системе управления.

Второй составляющей системно-процессного подхода является процессный подход. Он известен применительно к управлению в целом. Он рассматривает управленческую деятельность как непрерывное выполнение комплекса определенных взаимосвязанных между собой видов деятельности и общих функций управления (прогнозирование и планирование, организация и т.д.). Причем выполнение каждой работы общих функций управления здесь также рассматривается в виде процесса, т.е. как совокупности взаимосвязанных непрерывно выполняемых действий, преобразующих некоторые входы ресурсов, информации и т.п. в соответствующие выходы, результаты.

В качестве примера процессного подхода приведем алгоритм, описывающий завершение события (рис. 2) [3].

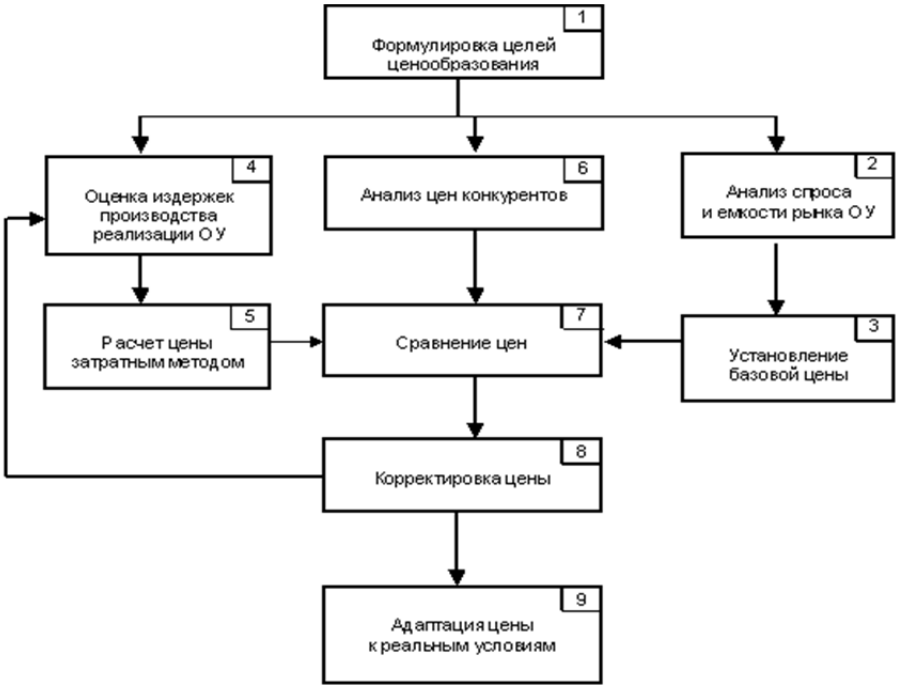


Рис. 2. Пример процессного подхода на примере элементарного алгоритма

Часто выход одного процесса является входом для другого, а сам процесс управления определяется суммой всех связанно выполняемых функций (рис. 3). В рамках такого подхода изучение системы управления следует рассматривать как выполнение исследовательских работ и общих управленческих функций по их реализации (исследовательского управленческого цикла) в виде процесса – непрерывной серии взаимосвязанных действий, т.е. как работу по достижению целей исследования. При процессном подходе характерна ориентация на совокупность непрерывно осуществляемых действий по всем исследовательским работам, включающим в себя общие управленческие функции (прогнозирование, планирование, организация работ, координация, выполнение работ, регулирование, активизация и стимулирование, учет, контроль и анализ), преобразующие входы в выходы и представляющие собой процессный подход к исследованию системы управления.

Рис. 3. Основные составляющие процесса исследования

Технологически процессный подход к исследованию осуществляется последовательно, параллельно и последовательно-параллельно, однако наиболее жизнеспособным из названных подходов является последовательно-параллельный (рис. 4).

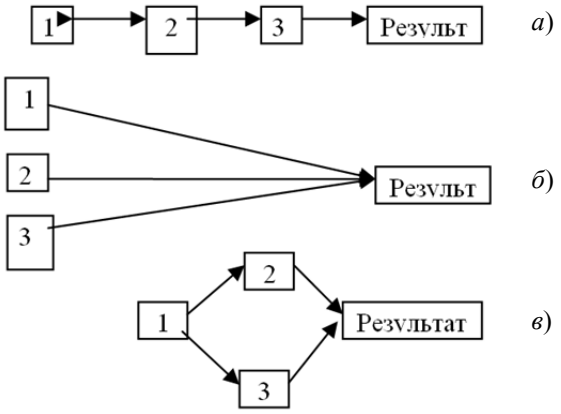


Рис. 4. Виды процессного подхода к исследованию:
а – последовательный; *б* – параллельный; *в* – последовательно-параллельный.

Преимущество процессного подхода состоит в следующем:

– непрерывности взаимосвязанного проведения исследовательских работ;
– получении синергетического исследовательского результата;
– более полном выполнении требований к проведению исследований;
– постоянном улучшении процессов, основанных на объективных результатах исследования.

Применение процессного подхода к управлению организацией является не только возможным, но и необходимым условием для повышения конкурентоспособности каждой организации, которое помогает повысить как управляемость организации, так и снизить зависимость от человеческого фактора и создать условия для сокращения затрат [4, 5].

Большинство предприятий одновременно ведут и выполняют большое количество проектов, ведение которых затрудняется сложностью их организации, масштабами проведения и необходимостью оптимизации материальных и нематериальных ресурсов. Правильный подход к их управлению поможет:

– систематизировать большое количество процессов, в которых задействован руководитель, исполняющий при этом разные роли: инициатора, ответственного исполнителя, контролера;
– организовать огромное количество документов, которые требуют согласования, уточнения, реакции, отслеживания, исполнения;
– организовать постоянно растущие объемы дополнительной информации, необходимой для принятия управленческих решений;
– контролировать своевременное исполнение заданий и отслеживание взятых на себя обязательств.

Для достижения вышеперечисленных эффектов в организации процесса ведения проектов предлагается применение системно-процессного подхода. Детальное планирование, моделирование и последующий четкий контроль способствуют снижению риска срыва проектов и оптимизации затрат.

Дальнейшее развитие принципов и методов управления проектами особенно важно для условий российской науки. Управление проектами дает возможность крупным предприятиям улучшить систему планирования, контроля, лучше использовать трудовые и материальные и нематериальные ресурсы.

Широкое использование принципиально новых подходов к управлению, подготовке, разработке и реализации проектов является одной из наиболее актуальных задач.

Список литературы

1. Управление проектами. Зарубежный опыт / под ред. В. Д. Шапиро. – СПб. : ДваТрИ, 1993. – 443 с.
2. Модели и методы оптимизации региональных программ развития / Н. Г. Андронникова, С. А. Баркалов, В. Н. Бурков, А. М. Котенко. – М. : ИПУ РАН, 2001. – 60 с.
3. Задачи управления материально-техническим снабжением в рыночной экономике / С. А. Баркалов, В. Н. Бурков, П. Н. Курочка, Н. Н. Образцов. – М. : ИПУ РАН, 2000. – 58 с.
4. Баркалов, С. А. Индивидуальные стратегии предложения труда: теория и практика / С. А. Баркалов, Д. А. Новиков, С. С. Попов. – М. : ИПУ РАН, 2002. – 109 с.
5. Юрков, Н. К. Концепция синтеза сложных наукоемких изделий / Н. К. Юрков // Надежность и качество : тр. междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – Т. 1. – С. 3–6.

УДК 005.8

Петелин, К. С.

К проблеме системно-процессного подхода в управлении сложным наукоемким предприятием / К. С. Петелин // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 2. – С. 59–64.

Петелин Кирилл Сергеевич
инженер-аналитик,
ОАО «НИИФИ»,
440026, г. Пенза, ул. Володарского, 9.
E-mail: kirill.petelin@gmail.com

K. Petelin
engineer analyst
OJSC «NIIF»
Penza, 440026, st. Volodarskogo, 9.
E-mail: kirill.petelin@gmail.com

Аннотация. Рассматривается возможность применения системно-процессного подхода как меры для повышения эффективности формирования управленческих стратегий функционирования промышленного предприятия. Приведены описание составных частей предлагаемого подхода, их характеристики и свойства. Описан предполагаемый эффект при применении системно-процессного подхода для управления проектами на промышленном предприятии.

Ключевые слова: управление проектами, мультипроекты, системно-процессный подход, оптимизация проектов.

Abstract. The possibility of a system-process approach as a measure to improve the formation of the functioning of the management strategies of the industrial enterprise. A description of the components of the proposed approach, their characteristics and properties. Described my alleged effects with systemic-process approach to project management in an industrial plant.

Key words: project management, multiproject, system-process approach, optimization projects.

УДК 621.396.6, 621.8.019.8

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ И СИСТЕМ

В. В. Жаднов

Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ в 2013 г. На ранних этапах проектирования, где закладывается та долговечность, которая будет реализована при изготовлении и обеспечена при эксплуатации, основным методом подтверждения требований электронных средств (ЭС) космических аппаратов (КА) и систем по долговечности является расчетная оценка (прогнозирование) минимальной наработки ($T_{МН}$).

Расчет показателей долговечности ЭС проводится по методикам, приведенным в ОСТ 4.012.013 [1]. Однако в этом стандарте приведен пример расчета для критерия предельного состояния «Ухудшение функционирования РЭА не более чем на 20 % (т.е. ресурс не более чем 20 % ЭРЭ может быть израсходован)». Такой критерий вполне допустим для восстанавливаемой аппаратуры, но не подходит для ЭС КА, которые в течение всего срока активного существования (САС) должны обеспечивать нормальное функционирование. В этом случае критерий отказа должен формулироваться как «Ухудшение функционирования ЭС КА не более чем на 0 %». Тогда в соответствии с методикой ОСТ 4.012.013 [1]:

$$T_{\text{МН}} = \min_{i=\overline{1,I}} \{T_{\text{МН}1}, T_{\text{МН}2}, ..., T_{\text{МН}i}\}, \tag{1}$$

где $T_{\text{МН}i}$ – минимальная наработка i-й составной части; I – общее число составных частей в ЭС.

В соответствии с ОСТ4Г0.012.242 [2] составная часть (СЧ) – это самостоятельная, четко выделяемая конструктивно или функционально законченная часть аппаратуры, дальнейшая детализация которой не является необходимой в пределах проводимого расчета надежности. Как правило, СЧ ЭС представляют собой электронные модули 1-го уровня (ЭМ1), в состав которых входят электрорадиоизделия (ЭРИ). Так как критерии предельного состояния ЭМ1 аналогичны ЭС, то расчет $T_{МН}$ ЭМ1 также проводится по формуле (1).

Таким образом, исходными данными для расчетов показателей долговечности и ЭМ1, и ЭС являются минимальные наработки ЭРИ.

Численные значения $T_{МН}$ для ЭРИ, разработанных в соответствии с требованиями комплекса российских военных стандартов «Климат-6», приведены в технических условиях и в справочнике [3]. При отсутствии данных о $T_{МН}$ ее значение можно определить по значению гамма-процентного ресурса (T_γ) по формуле ОСТ 4.012.013 [1]:

$$T_{\text{МН}} = \frac{\left(1 - 0{,}15 \cdot \chi_{0{,}999}\right)}{\left(1 - 0{,}15 \cdot \chi_{\gamma}\right)} \cdot T_{\gamma}, \tag{2}$$

где $\chi_{0,999}$ – квантиль нормального распределения для вероятности 0,999; χ_γ – квантиль нормального распределения для вероятности γ; T_γ – гамма-процентный ресурс ЭРИ.

Значения χ определяются по интегральной функции нормального распределения, график которой приведен на рис. 1.

Экспериментально полученные данные о T_γ ЭРИ приведены в таблицах «Характеристики надежности отдельных типов приборов» справочника [3]. При этом для изделий с относительно большим ресурсом значение γ принято равным 0,95, а для ЭРИ с ограниченным ресурсом – 0,9. Кроме того, если по результатам испытаний на долговечность конкретных типов ЭРИ получены значения T_γ, большие, чем по ТУ, то в справочнике [3] указаны именно эти (фактические) значения.

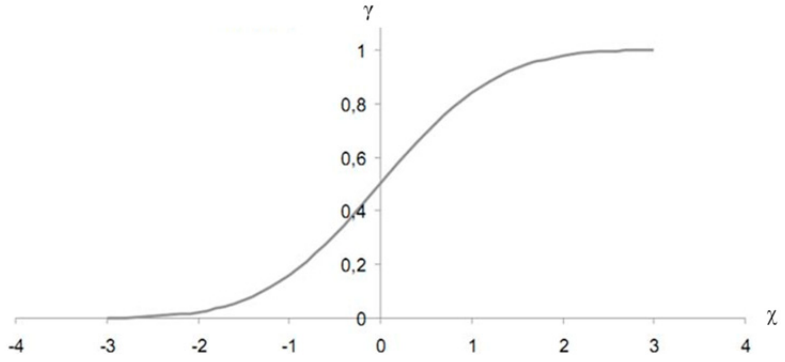


Рис. 1. Функция нормального распределения

Хотя в явном виде формулы, связывающей значения T_γ и среднего ресурса, а точнее математического ожидания среднего ресурса ($T_{P.Cp}$) в ОСТ 4.012.013 [1] не приведено, ее несложно получить, так как исходя из (2) средний ресурс представляет собой случайную величину (t_{PCp}), которая распределена по нормальному закону с математическим ожиданием $m = m(t_{PCp}) = T_{PCp}$ и среднеквадратическим отклонением $\sigma = \sigma(t_{PCp}) = 0{,}15T_{PCp}$ (рис. 2).

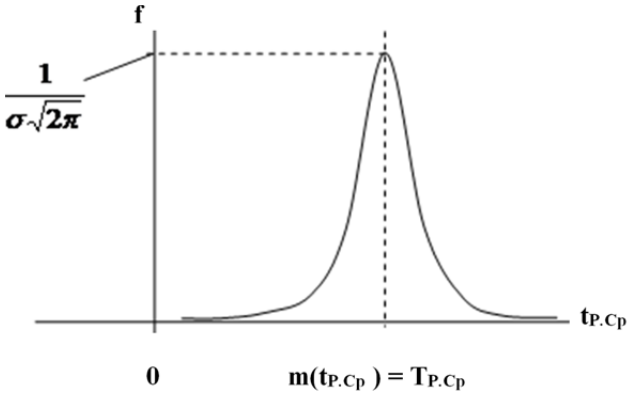


Рис. 2. Плотность вероятности нормального распределения

Тогда

$$T_{PCp} = \frac{T_\gamma}{\left(1 - 0{,}15 \cdot \chi_\gamma\right)}. \tag{3}$$

Кроме того, в ОСТ 4.012.013 [1] приведена формула, связывающая значения T_γ и гамма-процентного срока службы ($T_{Сл\gamma}$):

$$T_{Сл\,\gamma} = \frac{T_\gamma}{8760}.$$

Формула, связывающая значения $T_{Сл\gamma}$ и среднего срока службы ($T_{СлСр}$), аналогична (3). Таким образом, зная любой из показателей долговечности ЭРИ (T_γ, T_{PCp}, $T_{Сл\gamma}$, $T_{СлСр}$), несложно определить $T_{МН}$ ЭРИ, а следовательно, и показатели долговечности ЭМ1, и САС ($T_{САС}$) ЭС [4, 5].

Однако в результате расчетов может оказаться, что $T_{МН} < T_{САС}$. Так как значения показателей долговечности ЭРИ в нормативно-технической документации приводятся для «всех режимов по ТУ» (т.е. для «наихудшего случая» – Н.С.), то в ОСТ 4.012.013 [1] приведена формула, позволяющая уточнить значения $T_{МН}$ для конкретного режима применения ЭРИ:

$$T_{МН} = \frac{T_{МН}\left(HC\right)}{K_И \cdot K_Н}, \tag{4}$$

где $K_И$ – коэффициент использования ЭРИ; $K_Н$ – коэффициент нагрузки ЭРИ (по критичному параметру).

Рассмотрим расчет $T_{МН}$ на примере соединителя типа ШР (рис. 3).

Рис. 3. Соединитель типа ШР

В справочнике [3] для соединителей такого типа приведено значение $T_{М.Н}$ («во всех режимах по ТУ»), равное 1000 ч при «максимальном количестве сочленений-расчленений» – 500. Исходя из этого можно сделать вывод о том, что «критичным параметром» соединителя является «количество сочленений-расчленений».

В то же время в работе [6] приведена таблица с рекомендуемыми значениями коэффициентов нагрузки ЭРИ (табл. 1).

Таблица 1

Рекомендуемые значения коэффициентов нагрузки ЭРИ

Класс ЭРИ	Критичный параметр	Значения $К_н$		
		Минимальное	Максимальное	
			Режим	
			Кратковременный	Длительный
Диоды полупроводниковые	Средний выпрямленный ток	0,1	0,8	0,5
	Обратное напряжение	0,1	0,8	0,5
Транзисторы	Ток эмиттера	0,1	0,8	0,5
	Ток коллектора	0,1	0,8	0,5
	Мощность рассеивания на коллекторе	0,1	0,6	0,3
	Обратное напряжение на переходах	0,1	0,8	0,5
Интегральные схемы	Рассеивая мощность	–	0,7	0,5
Резисторы постоянные	Рассеивая мощность	0,1	0,7	0,5
Резисторы переменные	Квадрат тока	0,1	0,7	0,5
Конденсаторы электролитические	Напряжение	0,3	0,7	0,5
Конденсаторы прочие	Напряжение	0,1	0,7	0,5
Электровакуумные приборы	Рассеивая мощность	–	–	0,7
	Анодное напряжение	–	–	0,8
Силовые трансформаторы	Плотность тока	0,1	0,9	0,8
Дроссели	Плотность тока	0,1	0,9	0,9
Коммутационные изделия	Коммутируемый ток	*	0,8**	–
Соединители	Ток	*	–	0,8
Реле	Коммутируемый ток	*	0,8**	–

Примечания.

* – минимальное значение тока определяется исполнением (защитой и материалом контактов).

** – при активной нагрузке.

Заметим, что как следует из табл. 2, одно и то же ЭРИ может иметь несколько «критичных параметров», в то время как в формуле (4) такой параметр должен быть только один. Поэтому для оценки $T_{МН}$ следует выбирать тот параметр, по которому $К_Н$ имеет наибольшее значение.

Исходя из данных справочника [3] и работы [6] соединитель имеет, как минимум, два «критичных параметра»: количество сочленений-расчленений и ток (I). Для определенности положим, что соединитель входит в состав ЭС, относящейся к группе 5.4 по классификации ГОСТ РВ 20.39.304 [8], и примем «количество сочленений-расчленений» за период САС = 10. Исходя из данных табл. 1 примем $I_{Раб} = 0{,}8I_{Мах}$. Тогда для максимального значения $K_Н = 0{,}8$ по формуле (4) получим $T_{МН} = 1250$ ч.

Оценим возможность применения такого соединителя в ЭС КА исходя из классификации групп бортовой космической аппаратуры, приведенной в ГОСТ РВ 39.304 [8] (см. табл. 2).

Как видно из табл. 2, такие соединители можно применять только в аппаратуре группы исполнения 5.А. Оценим максимальные требования ТЗ для группы 5.Д.

Коэффициент использования ЭРИ рассчитывается по формуле, приведенной в РДВ 319.01.19 [7]:

$$К_И = \frac{t_{\Sigma рр}}{t_{\Sigma рр} + t_{\Sigma эх}}, \qquad (5)$$

где $t_{\Sigma рр}$, $t_{\Sigma эх}$ – суммарные времена нахождения ЭРИ в режиме работы и в режиме ожидания за период $Т_{САС}$.

Таблица 2

Группы бортовой космической аппаратуры и ресурс космических аппаратов

Группа исполнения	Назначение аппаратуры	Время активного существования, ч
5.А	Аппаратура, предназначенная для установки на КА с кратковременным сроком активного существования, работающая в дежурном режиме	До 10000
5.Б	Аппаратура, предназначенная для установки на КА со средним сроком активного существования, работающая в дежурном режиме	От 10000 до 30000
5.В	Аппаратура, предназначенная для установки на КА с длительным сроком активного существования, работающая в дежурном режиме	От 30000 до 70000
5.Г	Аппаратура, предназначенная для установки на КА со сверхдлительным сроком активного существования, работающая в дежурном режиме	Свыше 70000
5.Д	Аппаратура, предназначенная для установки на КА, работающая в сеансном режиме	По ТЗ

Для определенности положим $t_{\Sigma рр} = t_{\Sigma эх}$. Тогда по формуле (5) $K_И = 0{,}5$ и соответственно $T_{МН} = 2500$ ч.

Полученные результаты (0,14 и 0,28 лет) достаточно низкие. Однако в справочнике [5] приведено значение $T_{МН}$ «в облегченном режиме», равное 130 000 ч. Воспользуемся формулой (4) и найдем значение $K_Н$ для этого случая:

$$K_Н = \frac{1000}{130000} = 0{,}0077 .$$

Такой результат свидетельствует лишь о том, что одних данных справочника [3] и методик ОСТ 4.012.013 [1] для оценки показателей долговечности ЭРИ явно недостаточно. Для того, чтобы понять, что является «облегченным режимом», обратимся к технической документации (ТД) на соединители типа ШР [8], в которой приведена зависимость $Т_{МН}$ от его температуры (см. рис. 4).

Минимальная наработка, ч	Температура соединителя, °С
1000	110
3000	93
5000	85
7500	79
10000	75
15000	70
20000	66
25000	63
30000	61
40000	58
50000	55
80000	49
100000	47
130000	41

Примечание. Температура соединителя равна сумме рабочей температуры среды и температуры перегрева контактов (50 °С).

Рис. 4. Зависимость минимальной наработки от температуры соединителя

Как следует из рис. 4, «облегченным режимом» является пониженная температура соединителя (для обеспечения $T_{МН}$ = 130 000 ч необходимо обеспечить рабочую температуру среды, равную –9 °С). Теперь выясним, откуда взялась эта зависимость. В справочнике [3] для класса «Соединители» приведена математическая модель коэффициента режима ($K_Р$):

$$K_Р = e^{9000\cdot\left[\frac{1}{t_п+298}-\frac{1}{t+298+t_п\cdot e^{-1,8\cdot\left(1-\frac{I}{I_{max}}\right)}}\right]}, \qquad (6)$$

где $t_п$ – температура перегрева контактов по ТУ при максимальной токовой нагрузке; t – температура окружающей среды, °С; I – рабочий ток, А; I_{max} – максимально допустимый по ТУ ток, А.

Заметим, что в соответствии с табл. 1 отношение I / I_{max} в модели (6) численно равно коэффициенту $K_Н$ в формуле (4):

$$K_H = \frac{I}{I_{max}}. \qquad (7)$$

В табл. 3 приведены значения $K_Р$, определенные по таблице справочника [3] для $I = I_{max}$; $t_П$ = 50 °С, и рассчитанные по данным, приведенным на рис. 4.

Таблица 3

Зависимость $K_Р$ от рабочей температуры среды

Температура среды / соединителя, °С	$K_Р$	
	Справочник «Надежность ЭРИ»	ТД
25/75	1	1
29/79	–	1,33
30/80	1,44	–
35/85	2,06	2
40/90	2,91	–
43/93	–	3,33
45/95	4,08	–
50/100	5,66	–
55/105	7,79	–
60/110	10,63	10,0

Заметим, что модель (6) справедлива для температуры окружающей среды, изменяющейся в интервале от +25 до +115 °С, поэтому для наработок 130 000 – 15 000 ч (см. рис. 4) расчетные значения $K_Р$ в таблицах справочника [3] не приводятся, так как в этом случае температура среды изменяется в диапазоне от –9 до +20 °С.

Как видно из табл. 3, значения $K_Р$, определенные по справочнику [3] и по ТД [8], практически совпадают, что позволяет сделать вывод о том, что коэффициенты, влияющие на показатели безотказности и долговечности ЭРИ, рассчитываются по одним и тем же моделям, а следовательно, имеет место соотношение

$$\frac{T_{МН}(НС)}{T_{МН}} \sim \frac{\lambda_Э}{\lambda_Э(НС)}, \tag{8}$$

где $\lambda_Э$ – интенсивность отказов ЭРИ; $\lambda_Э$(НС) – интенсивность отказов ЭРИ для «наихудшего случая».

Воспользуемся (8) для оценки значения коэффициента $K_Н$. В справочнике [3] для класса «Соединители низкочастотные и радиочастотные», группы «Соединители низкочастотные на напряжение 1500 В цилиндрические для объемного монтажа», подгруппы «Резьбовые и байонетные нормальных габаритов», к которой относится соединитель типа ШР, приведена следующая математическая модель $\lambda_Э$:

$$\lambda_Э = \lambda_б \cdot K_Р \cdot K_{КК} \cdot K_{КС} \cdot K_Э \cdot K_{Пр}, \tag{9}$$

где $\lambda_б$ – базовая интенсивность отказов; $K_Р$ – коэффициент, учитывающий величину электрической нагрузки и (или) температуры окружающей среды (корпуса изделия); $K_{КК}$ – коэффициент, учитывающий количество задействованных контактов; $K_{КС}$ – коэффициент, учитывающий количество сочленений-расчленений в течение всего времени эксплуатации; $K_Э$ – коэффициент, учитывающий степень жесткости условий эксплуатации; $K_{Пр}$ – коэффициент, учитывающий степень жесткости требований к контролю качества и правила приемки изделий.

Однако исходя из формулы (1) коэффициент $K_{КК}$, зависящий от числа задействованных контактов, должен быть исключен. Кроме того, коэффициент $K_{Пр}$, который по сути определяет величину $\lambda_б$, а не нагрузку ЭРИ, также нужно исключить. С учетом этих замечаний формула (8) принимает вид

$$\frac{T_{МН}(НС)}{T_{МН}} = \frac{K_Р \cdot K_{КС} \cdot K_Э}{K_Р(НС) \cdot K_{КС}(НС) \cdot K_Э(НС)} = \frac{K_Н(Э)}{K_Н(НС)} = K_Н. \tag{10}$$

Оценим значение $T_{МН}$ соединителя при следующих данных: $I_{Раб} = 0{,}8I_{Max}$; $t_{ПК} = 50$ °С; $t_{РС} = 60$ °С; количество сочленений-расчленений = 10; группа аппаратуры по ГОСТ РВ 20.39.304 [8] – 5.4.

«Наихудшим случаем» для соединителя тип ШР является: $I_{Раб} = I_{Max}$; $t_{П.К} = 50$ °С; $t_{Р.С} = 60$ °С; количество сочленений-расчленений = 500; группа аппаратуры по ГОСТ РВ 20.39.304 [7] – 4.1–4.9 (в условиях запуска).

Значения коэффициентов модели (9), полученные по таблицам справочника [3], приведены в табл. 4.

Таблица 4

Значения коэффициентов математической модели $\lambda_Э$

Обозначение	Значение	
	НС	Э
$K_Р$	10,63	4,05
$K_{КС}$	1,0	0,33
$K_Э$	7,5	4,0

Рассчитанные по данным табл. 4 значения $K_Н$(НС) = 79,725, $K_Н$(Э) = 5,346, $K_Н$ = 0,0671, а значение $T_{МН}$ в этом случае составило 15 000 ч (1,7 лет), т.е. при приведенных выше данных соединитель можно уже использовать и в аппаратуре группы исполнения 5.Б (см. табл. 2).

Таким образом, очевидно, что формула (10) дает более точную оценку значения $K_{Н}$, чем формула (7), так как позволяет учитывать нагрузку не по одному, а по всем «критичным параметрам» ЭРИ.

Теперь оценим максимальные требования технического задания (ТЗ) для группы 5.Д при тех же условиях. Заметим, что формула (4) дает завышенное значение $T_{М.Н}$, так как не учитывает того, что в режиме ожидания ЭРИ также расходует свой ресурс. В подтверждение этого приведем тот факт, что в РДВ 319.01.19 [7] расчет интенсивности отказов ЭРИ для сеансного режима работы ($\lambda_{С}$) проводится по формуле

$$\lambda_{С} = K_{И}\lambda_{Э} + \left(1 - K_{И}\right)\lambda_{ЭХ}, \tag{11}$$

где $\lambda_{Э}$ – интенсивность отказов в рабочем режиме; $\lambda_{ЭХ}$ – интенсивность отказов в режиме ожидания.

Исходя из (11) запишем

$$\begin{cases} \lambda_{С1} = K_{И}\lambda_{Э} \\ \lambda_{С2} = K_{И}\lambda_{Э} + \left(1 - K_{И}\right)\lambda_{ЭХ} \end{cases}. \tag{12}$$

Обозначим

$$\frac{\lambda_{С2}}{\lambda_{С1}} = K_{ПИ} \Rightarrow \lambda_{С1} = \frac{\lambda_{С2}}{K_{ПИ}}. \tag{13}$$

Подставим (13) в (12) и разрешим ее относительно $K_{ПИ}$:

$$K_{ПИ} = 1 + \frac{1}{K_{И}} \cdot \left(\frac{\lambda_{ЭХ}}{\lambda_{Э}}\right) - \left(\frac{\lambda_{ЭХ}}{\lambda_{Э}}\right).$$

Оценим величину $K_{ПИ}$. В работе [6] приведено следующее соотношение:

$$\lambda_{ЭХ} = 0,01\lambda_{Э}. \tag{14}$$

В этом случае $K_{ПИ}$ = 1,01; $K_{И}$ = 0,505, а $T_{МН}$ = 29 702 ч, что всего на 1 % ниже значения $T_{МН}$ (30 000 ч), полученного по формуле (4) без учета $K_{ПИ}$. Другое дело, что оценка (14) является достаточно грубо приближенной. В отличие от работы [6] в справочнике [3] для класса «Соединители низкочастотные и радиочастотные», к которому относится соединитель типа ШР, приведена следующая математическая модель интенсивности отказов ($\lambda_{ЭХ}$) для режима ожидания (хранения):

$$\lambda_{ЭХ} = \lambda_{б} K_{Х} K_{t.X} K_{Э} K_{Пр}, \tag{15}$$

где $\lambda_{б}$ – базовая интенсивность отказов ЭРИ; $K_{t.X}$ – коэффициент, учитывающий изменение интенсивности отказов в зависимости от температуры окружающей среды; $K_{Э}$ – коэффициент, учитывающий степень жесткости условий эксплуатации; $K_{Пр}$ – коэффициент, учитывающий степень жесткости требований к контролю качества и правила приемки изделий.

Значения коэффициентов моделей $\lambda_{ЭХ}$ и $\lambda_{Э}$ ($I_{Раб} = 0,8I_{Max}$; $t_{ПК}$ = 50 °С; $t_{РС} = t_{ХС}$ = 60 °С; количество задействованных контактов = 47; количество сочленений-расчленений = 10; группа аппаратуры по ГОСТ РВ 20.39.304 [9] – 5.4; приемка 9 (ОС), полученные по таблицам справочника [3] приведены в табл. 5.

Таблица 5

Значения коэффициентов математических моделей $\lambda_{ЭХ}$ и $\lambda_{Э}$

Обозначение	Значение
$\lambda_{б}$	$0,0008 \cdot 10^{-6}$
$K_{Р}$	4,05
$K_{К.К}$	9,5
$K_{К.С}$	0,33
K_{X}	0,21
$K_{t.X}$	11,68
$K_{Э}$	4,0
$K_{Пр}$	0,5

При этих значениях коэффициентов в соответствии с (15) $\lambda_{Э.Х} = 0{,}00392448 \cdot 10^{-6}$ ч$^{-1}$, в соответствии с (9) $\lambda_Э = 0{,}0203148 \cdot 10^{-6}$ ч$^{-1}$, а значение $K_{ПИ} = 1{,}193$.

Тогда

$$T_{МН} = \frac{T_{МН}(НС)}{K_{ПИ} \cdot K_И \cdot K_Н} = \frac{1000}{1{,}193 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}0671} = 25\,000,$$

т.е. в этом случае полученное значение $T_{МН}$ уже на 16,7 % ниже значения, полученного по формуле (4) без учета $K_{ПИ}$.

Таким образом, как показывают приведенные выше примеры, использование характеристик безотказности позволяет уточнить значения коэффициентов $K_И$ и $K_Н$, а следовательно, и расчетную оценку показателей долговечности ЭРИ, ЭМ1 и ЭС КА в целом [10].

Другой вопрос, можно ли использовать значение средней наработки (T_0) ЭРИ для оценки значения $T_{МН}$ (или T_γ, $T_{РСр}$, $T_{Сл.\gamma}$, $T_{СлСр}$). Эта задача является актуальной, так как в современных ЭС, наряду с ЭРИ отечественного производства, широко используются и ЭРИ иностранного производства (ИП), в *Data Sheet* на которые показатели долговечности не приводятся [10]. Это в полной мере относится и к зарубежным справочникам по надежности (например, стандарт [11]), и к отечественному справочнику [12].

Для получения оценки $T_{МН}$ на практике часто поступают следующим образом: принимают значение вероятности безотказной работы (P) за время $T_{МН}$, равным значению γ. Так как закон распределения наработки ЭРИ экспоненциальный, то составляют следующее уравнение для $\gamma = 0{,}999 = P(T_{МН})$:

$$0{,}999 = e^{-\frac{T_{М.Н}}{T_0}}. \qquad (16)$$

Разрешив (16) относительно $T_{МН}$, получают

$$T_{МН} = -\ln(0{,}999) \cdot T_0 = 0{,}001 \cdot T_0 = \frac{0{,}001}{\lambda_Э},$$

где $\lambda_Э$ – эксплуатационная интенсивность отказов ЭРИ.

Значение $\lambda_Э$ рассчитывают по моделям, приведенным в справочнике [12] или стандарте [11].

Использование (16) справедливо в том случае, если критерий предельного состояния сформулирован как «Отказ ЭРИ».

Однако по классификации ГОСТ 27.003 [13] ЭРИ относятся к изделиям общего назначения вида I (высоконадежное комплектующее изделие межотраслевого применения), непрерывного длительного применения, невосстанавливаемое, необслуживаемое, переход которого в предельное состояние не ведет к катастрофическим последствиям, изнашиваемое, стареющее при хранении. Для таких изделий нормируются следующие показатели надежности:

– интенсивность отказов – λ;

– средний ресурс – $T_{р.ср}$;

– средний срок сохраняемости – $T_{с.ср}$.

Тогда, если следовать (16) очевидно, что одновременно нормировать и λ, и $T_{с.ср}$ не имеет смысла. Поскольку для ЭРИ нормируются оба показателя, то в этом случае критерий предельного состояния должен формулироваться как «Повышение интенсивности отказов выше допустимого уровня λ». А из этого следует, что формула (16) ничем не обоснована, так как величина $T_{РСр}$ характеризует не величину интенсивности отказов ЭРИ, а только среднюю длительность периода его «нормальной эксплуатации» (рис. 5), в течение которого значение $\lambda_Э$ принимается постоянной величиной (равной λ).

Рис. 5. Зависимость $\lambda_Э$ от времени

После периода «нормальной эксплуатации» наступает «период старения», на котором интенсивность отказов резко возрастает вследствие естественных процессов старения, изнашивания и др., что приводит к превышению допустимого уровня λ (достижению ЭРИ предельного состояния).

В свою очередь значение γ характеризует не время, за которое вероятность безотказной работы ЭРИ примет значение 0,999, а только доверительную вероятность, с которой случайная величина t_{PCp} будет принимать значения не меньше, чем значение $T_{МН}$.

В заключение следует отметить, что характеристики безотказности ЭРИ могут быть использованы только для оценки значений коэффициентов $K_И$ и $K_Н$ в формуле (4), а проведение сертификационных испытаний ЭРИ ИП на долговечность остается основным способом оценки $T_{МН}$ и обоснования возможности их применения в ЭС КА [14].

Список литературы

1. ОСТ 4.012.013-84. Аппаратура радиоэлектронная. Определение показателей долговечности.
2. ОСТ Г0.012.242-84. Аппаратура радиоэлектронная. Методы расчета показателей надежности.
3. Затылкин, А. В. Алгоритм проведения проектных исследований радиотехнических устройств опытно-теоретическим методом / А. В. Затылкин, И. И. Кочегаров, Н. К. Юрков // Надежность и качество : тр. междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – Т. 1. – С. 365–367.
4. Сидорова, Е. А. Исследование процедуры формирования тестового воздействия при проведении диагностики логических устройств / Е. А. Сидорова, В. Я. Баннов, Н. К. Юрков // Надежность и качество : тр. междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – Т. 2. – С. 109–111.
5. Шавыкин, Н.А. Методика оценки показателей безотказности технических средств / Н. А. Шавыкин, Б. П. Петрухин, Е. М. Жидомирова. – М. : ИПУ РАН, 1998. – 79 с.
6. РДВ 319.01.19-98. Радиоэлектронные системы военного назначения. Методика оценки и расчета запасов в комплектах ЗИП.
7. Соединители типа ШР. – URL: http://zavod-elecon.ru/images/stories/pdf/ShR.pdf.
8. ГОСТ РВ 20.39.304-98. КСОТТ. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования стойкости к внешним воздействующим факторам.
9. Абрамешин, А. Е. Информационная технология обеспечения надежности электронных средств наземно-космических систем / А. Е. Абрамешин, В. В. Жаднов, С. Н. Полесский ; отв. ред. В. В. Жаднов. – Екатеринбург : Форт Диалог-Исеть, 2012. – 565 с.
10. MIL-HDBK-217F. Reliability prediction of electronic equipment. – USA : DoD, 1991.
11. ГОСТ 27.003-90. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности.
12. Жаднов, В. В. Особенности конструирования бортовой космической аппаратуры : учеб. пособие / В. В. Жаднов, Н. К. Юрков. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – 112 с.

УДК 621.396.6, 621.8.019.8

Жаднов, В. В.

Расчетная оценка показателей долговечности электронных средств космических аппаратов и систем / В. В. Жаднов // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 2. – С. 65–73.

Жаднов Валерий Владимирович
кандидат технических наук, доцент,
кафедра радиоэлектроники и телекоммуникаций,
Московский институт электроники и математики
Национального исследовательского университета
«Высшая школа экономики»,
109028, г. Москва, Б. Трехсвятительский пер., д. 3.
(8-499)137-26-80
E- mail: vzhadnov@hse.ru

Аннотация. Одним из показателей качества космических аппаратов и систем, требования к которому постоянно возрастают, является срок активного существования, который относится к группе показателей надежности и характеризует долговечность космических аппаратов. На значение срока активного существования влияют различные факторы, среди которых существенное значение имеет долговечность электронных средств.

Ключевые слова: электронные средства, космический аппарат, надежность, долговечность.

V. Zhadnov
PhD. tech. , Associate Professor of the Department
«Radioelek-tronics and Telecommunications»
Moscow Institute of Electronics and Mathematics
of National Research University
«Higher School of Economics»
(8-499)137-26-80
E-mail: vzhadnov@hse.ru

Abstract. One of indicators quality of spacecrafts and systems, the requirement to which constantly increase, term of active existence which belongs to group of indicators reliability is and characterizes durability of spacecrafts. Value of term active existence is influenced by various factors among which essential value has durability of electronic equipment.

Key words: electronic equipment, spacecraft, reliability, durability.

УДК 621.923

ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. А. Федорович, И. Н. Пыжов, Е. А. Бабенко, В. Г. Клименко

1. Постановка проблемы. На настоящий момент одним из наиболее используемых методов формообразования лезвийных инструментов и других изделий из поликристаллических сверхтвердых материалов (ПСТМ) остается шлифование кругами на основе шлифпорошков алмаза. Этот метод имеет широкие технологические возможности и может быть применен для обработки практически любых конструкционных и инструментальных материалов (от сверхмягких до сверхтвердых [1]). В связи с этим изыскание дополнительных возможностей для повышения эффективности этого процесса является актуальной проблемой.

2. Анализ последних исследований и публикаций. Особенностью процесса алмазного шлифования ПСТМ является отсутствие его устойчивости, поскольку он характеризуется периодичностью изменения значений выходных показателей во времени [2], что связано с нестабильностью процесса самозатачивания алмазных зерен круга. В первую очередь это обстоятельство отрицательно сказывается на качестве обработанной поверхности.

Для обеспечения постоянства во времени показателей качества процесса формообразования лезвийных инструментов из ПСТМ необходимо в максимальной степени реализовать на практике условия устойчивого протекания процессов их шлифования. В технической литературе, ориентированной на технологию машиностроения [3], уже имеется сформулированное определение понятия точности и устойчивости технологических процессов, и выполнена классификация их по видам устойчивости. При этом устойчивость техпроцесса связывают в первую очередь с точностью механической обработки, которая, как известно, является одним из основных объектов внимания технолога. Глубокий анализ точности технологического процесса возможен только на основе статистического исследования того размера, который формируется данным технологическим процессом.

По устойчивости технологические процессы можно разделить на полностью устойчивые, устойчивые по рассеиванию и неустойчивые (рис. 1) [4].

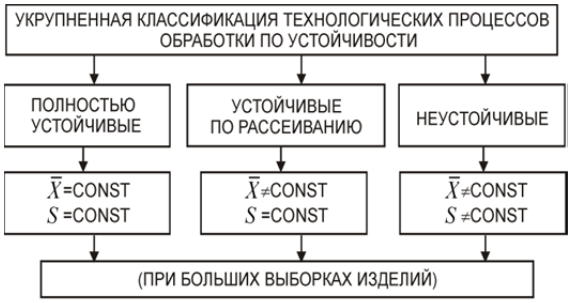


Рис. 1. Укрупненная классификация технологических процессов обработки по устойчивости

Полностью устойчивые процессы те, в которых за время изготовления изделий (большая выборка) значения числовых характеристик размера детали (среднего арифметического $\bar{X}$ и выборочного среднего квадратического отклонения S) остаются неизменными. Процессы, устойчивые по рассеиванию, сохраняют постоянной только характеристику рассеивания $\bar{X}$, а среднее арифметическое S изменяется. Если $\bar{X}$ и S меняются во времени, то такие процессы называются неустойчивыми.

Приведенная классификация технологических процессов по характеру поведения во времени числовых характеристик размера – это классификация с математической точки зрения.

3. Цель исследования. Целью настоящей работы является изыскание путей стабилизации комбинированного процесса шлифования и решения на этой основе проблемы формообразования лезвийных инструментов и изделий из ПСТМ.

4. Основные материалы исследования. Классический подход в технологии машиностроения состоит в том, что в производстве не должно быть неустойчивых технологических процессов. Однако на практике имеется много технологических процессов, устойчивых по рассеиванию, у которых центр группирования смещается в процессе обработки в основном за счет износа режущего инструмента, но характеристика рассеивания остается неизменной [3].

Применительно к формообразованию лезвийных инструментов из ПСТМ (и особенно на основе алмаза), обладающих уникальными физико-механическими свойствами и в первую очередь самой высокой в природе микротвердостью, говорить о полной устойчивости по точности сложно ввиду аномально высоких значений размерного износа инструмента второго порядка (линейного износа алмазных кругов). Это не позволяет при работе на предварительно настроенных станках [4] выполнить условие $\bar{X}$ = const. Поэтому речь может идти об устойчивости по рассеиванию (S = const). Однако применительно к качеству обработанной поверхности можно говорить и о полной устойчивости.

Известно [3, 5], что довести техпроцесс до устойчивого состояния можно, выдержав следующие требования (рис. 2):

– устранив нестабильность показателей точности станка;

– получив стабильные по точности и физико-механическим свойствам заготовки;

– достигнув стабильности работы инструмента.

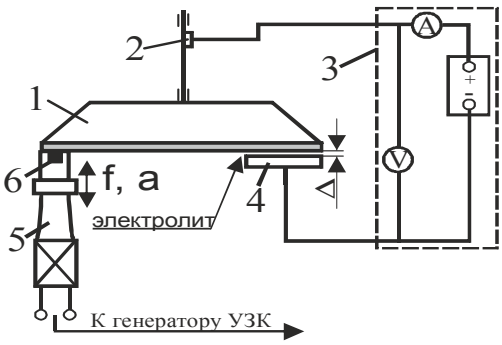


Рис. 2. Схема способа алмазного шлифования с управлением РПК:
1 – алмазный круг; 2 – токосъемник; 3 – источник питания; 4 – правящий катод;
5 – устройство ультразвукового правки; 6 – ПСТМ

В данной работе рассматривается понятие технологической устойчивости. Речь идет о создании условий для обеспечения устойчивости выходных показателей процессов шлифования, которые являются основой проектируемых технологических процессов изготовления изделий из ПСТМ.

С учетом того, что один из основных факторов, обеспечивающих технологическую устойчивость, связан со стабильностью работы алмазного круга, эти условия сформулированы следующим образом:

– создание условий для обеспечения технологической устойчивости процесса шлифования еще на этапе спекания алмазоносного слоя круга (который сопровождается высокими значениями силовой и тепловой напряженности) путем сохранения его неизменной характеристики;

– обеспечение непрерывности процесса самозатачивания алмазных зерен в процессе шлифования;

– обеспечение высокого уровня износостойкости режущего рельефа алмазного круга;

– наличие высокоэффективных способов управления режущим рельефом и профилем алмазных кругов и устройств для их осуществления;

– использование автоматической следящей системы для надежного поддержания постоянства во времени параметров, характеризующих состояние РПК.

С целью установления физических особенностей в зонах контакта покрытого зерна со связкой и обрабатываемым ПСТМ и выявления на этой основе возможных резервов процесса шлифования были выполнены теоретико-экспериментальные исследования НДС системы «связка круга – алмазное зерно – рельефное толстослойное покрытие – обрабатываемый материал» с учетом наличия металлофазы в зерне. Расчеты показали, что наличие металлического покрытия на алмазном зерне вносит существенные коррективы в НДС этой системы [4].

Установлено, что важную роль в обеспечении технологической устойчивости играют толстослойные рельефные металлические покрытия на алмазных зернах. 3D-анализ напряженно-деформированного состояния показал, что их наличие на алмазном зерне при тех же условиях термосилового нагружения системы существенно уменьшает величину напряжений на границе «зерно-связка». Это можно объяснить значительным увеличением поверхности контакта покрытого зерна со связкой круга, что в свою очередь является подтверждением факта лучшего удержания зерен в связке, а следовательно, повышения их режущего ресурса. С другой стороны, покрытие способствует сохранению целостности алмазного зерна при спекании, что в свою очередь является одним из факторов обеспечения стабильности процесса шлифования.

Установлено, что появление площадок износа на вершинах зерен согласно реализации явления приспосабливаемости снижает и впоследствии полностью исключает ощутимый съем объемов поликристалла [1]. Для обеспечения непрерывности процесса самозатачивания алмазных зерен в процессе шлифования и высокого уровня износостойкости режущего рельефа алмазного круга необходимо выполнить одно из основополагающих условий. Оно заключается в создании условий для непрерывного самозатачивания круга при условии, что высота выступания зерен над уровнем связки имеет некое минимальное значение. При этом в контакте с ПСТМ будет находиться максимальное количество алмазных зерен. Другими словами, таким способом можно регулировать величину их концентрации, а следовательно, и износостойкость режущего рельефа круга.

В связи с этим нами предложена идея [1] сочетания способов непрерывного электрохимического удаления связки с рабочей поверхности круга (РПК) и ультразвукового воздействия на алмазные зерна [6], эффект от которого в условиях высокоскоростного контактного взаимодействия двух высокотвердых материалов проявляется наиболее ярко [7]. Для обеспечения требуемого соответствия скоростей износа режущего рельефа и электрохимического удаления связки круга, которое можно считать основополагающим в плане практической реализации условий, обеспечивающих технологическую устойчивость, необходимо использовать схему автоматического поддержания плотности технологического тока в цепи управления режущим рельефом круга на металлической связке [1].

В то же время ультразвуковые колебания позволяют не только исключить образование на алмазных зернах площадок износа, но и обеспечить непрерывное формирование на них микро- и субмикрорельефа [7], что в конечном итоге позволяет обеспечить высокую интенсивность съема припуска.

Таким образом, методология управления режущими свойствами кругов в процессе шлифования должна базироваться на формировании и поддержании в течение всего периода обработки энергетически неустойчивых состояний зерен и их структуры путем дозированного воздействия, направленного на предотвращение топографической и структурной приспосабливаемости рабочей поверхности алмазных кругов. Достичь этого выбором характеристики кругов и режимов шлифования практически невозможно. *Принудительное формирование режущего субмикрорельефа алмазных зерен.* Поскольку главной причиной потери режущих свойств алмазными кругами при шлифовании ПСТМ является массовое образование на зернах площадок износа [8], основным способом повышения эффективности процесса является формирование на зернах необходимых параметров микро- и субмикрорельефа.

Предварительные исследования процесса шлифования с переменным давлением в контакте в условиях управления режущим рельефом кругов показали его высокие перспективы даже при низких частотах прикладываемой нагрузки (таблица, условия обработки: круг 12А2–45° 150 × 10 × 3 × 32 АС6 160/125 М1-01 100 %, V_k = 20 м/с; S = 1 м/мин; I = 70 А; S_k = 20 мм^2):

1) шлифование с постоянным давлением в контакте $P_{пост}$ = 70 Н ($P_{доп}$ = 0);

2) шлифование с постоянным давлением $P_{пост}$ = 100 Н ($P_{доп}$ = 0);

3) шлифование с переменным давлением в контакте $P_{пост}$ = 30 Н, $P_{доп}$ = 40 Н ($P_{сум}$ = 70 Н, f = 5 Гц; A = 6 мм).

При этом производительность процесса Q возрастает, а значения удельного расхода и удельной себестоимости снижаются примерно в два раза (табл. 1).

Таблица 1

Показатели различных способов шлифования СКМ-Р

Способ обработки	Значения выходных показателей обработки		
	Q, мм^3/мин	q, мГ/мм^3	$C_{уд.}$, коп/мм^3
1	2,3	73	125
2	3,5	44	85
3	4,3	35	70

Эти данные, в частности, свидетельствуют о том, что в условиях взаимодействия двух материалов, имеющих предельную твердость, именно переменная нагрузка на алмазные зерна способна эффективно обеспечивать непрерывность процесса их самозатачивания, что, как отмечалось выше, является основополагающим условием стабилизации процесса обработки в целом.

В связи с изложенным было выдвинуто предположение о том, что в условиях непрерывного электрохимического удаления связки круга наиболее целесообразно управлять формированием субмикрорельефа на зернах круга с помощью ультразвуковых колебаний, что можно реализовать как в зоне обработки, так и в автономной зоне. В первом случае в качестве ударника выступает сам обрабатываемый ПСТМ (см. рис. 2), а во втором – специальный инструмент-ударник, например, с прочными и мелкими алмазными зернами.

Наиболее эффективным представляется способ ультразвукового шлифования, но только не с продольными колебаниями, как это обычно принято для улучшения качества обработки [9], а с поперечными, создающими дополнительные ударные нагрузки в контакте «зерно–ПСТМ». Это, с одной стороны, интенсифицирует процесс съема припуска, а с другой – обеспечивает процесс формирования на поверхностях износа зерен режущего микро- и субмикрорельефа. Естественно, такой способ эффективен только в тех случаях, когда дополнительная энергия ультразвука, вводимая в зону шлифования, не будет приводить к образованию дефектного слоя в процессе ультразвукового шлифования.

Многочисленные модельные эксперименты показали высокую эффективность формирования на зернах субмикрорельефа как фактора одновременного повышения как производительности процесса шлифования ПСТМ, так и коэффициента использования алмазных зерен, так как алмазное зерно остается активно работающим в течение более продолжительного времени.

Экспериментально установлено, что применительно к обработке ПСТМ на основе алмаза использование энергии ультразвука в сочетании с непрерывной электрохимической правкой круга позволяет до семи раз повысить производительность шлифования при одновременном снижении удельного расхода алмазов круга до десяти раз.

Это объясняется тем, что в работе участвует предельно возможное количество зерен круга, а оптимальное значение силы в цепи управления сдвигается в большую сторону (с 55 до 100А).

Выполненные исследования позволили разработать автоматическую систему непрерывного поддержания режущего рельефа и профиля круга в требуемом состоянии практически на протяжении всего периода работы круга. Это особенно важно в случае применения сложнопрофильных кругов. В основу этого способа положено пять главных принципов:

1) применение токопроводящих кругов на основе микропорошков алмаза, в результате чего обеспечивается возможность реализации малых значений межэлектродного зазора (МЭЗ);

2) использование кругов с предварительно сформированным профилем, что позволяет считать площадь в зоне управления величиной постоянной;

3) обеспечение равновесного МЭЗ перед началом управления РПК за счет правки ЭИ новым кругом на обратной полярности;

4) учет факта возможного изменения электропроводности электролита в процессе формообразования путем использования датчика электропроводности электролита;

5) использование автоматической следящей системы.

Схема способа представлена на рис. 3. Его характерная особенность заключается в том, что перед формообразованием токопроводящего круга на основе микропорошков алмаза (уже имею-

щего заданный точный профиль) включают «обратную» полярность (круг – «–», а катод – «+») источника питания *6* и с помощью этого круга подправляют рабочую поверхность катода, предварительный профиль которой близок к своему окончательному состоянию.

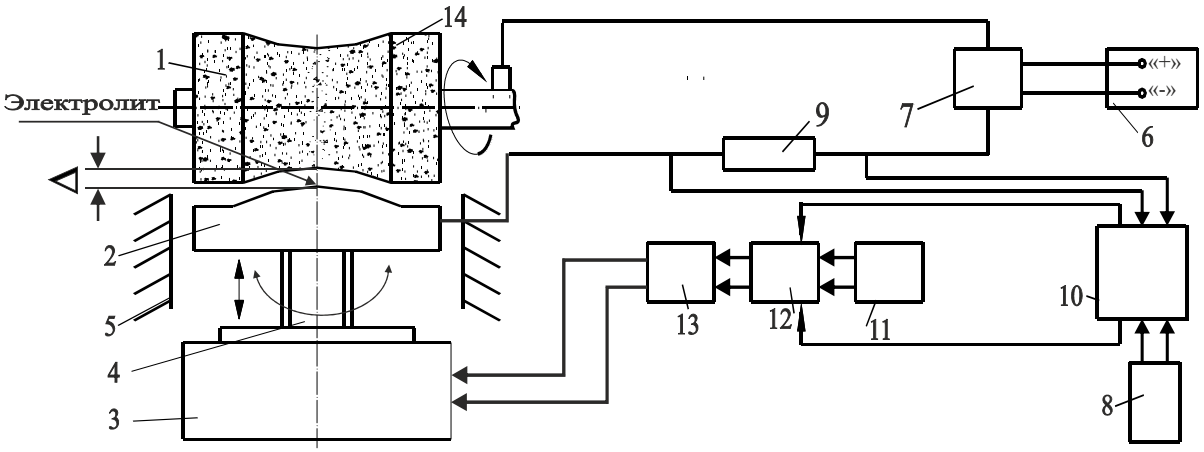


Рис. 3. Схема способа алмазного шлифования с управлением РПК с автоматической следящей системой

При этом режимы правки катода *2*, установленного на направляющих *5*, аналогичны рабочим режимам правки круга *1*. Это позволяет решить две важные задачи: во-первых, получить необходимый профиль катода (который расчетным методом получить довольно сложно) с одновременной компенсацией различного рода погрешностей (например, погрешность установки), а во-вторых, обеспечить равновесный МЭЗ.

Затем осуществляют рабочий процесс правки круга на «прямой» полярности, для чего используется реверсивный переключатель *7*. Особенностью этого способа является то, что, во-первых, в процессе правки катода устанавливается МЭЗ, имеющий одинаковую электрическую проводимость, а следовательно, и одинаковую плотность тока практически в любой его точке. По мере износа круга этот зазор поддерживается неизменным с помощью реверсивного электродвигателя *3*, управляемого блоком автоматики, с помощью пары «винт-гайка», что также не допускает возможности искажения профиля рабочей поверхности катода в результате его соприкосновения с кругом.

Как видно из рисунка, правка круга производится в автоматическом режиме. Еще одной важной особенностью данного способа является то, что в электрическую схему введен датчик электропроводности электролита *11*, что позволяет существенно повысить надежность процесса. Сигналы от шунта *9* и источника стабилизированного напряжения *8* сравниваются в устройстве *10*. Результирующий сигнал поступает в сумматор *12*, где корректируется в зависимости от величины сигнала с датчика *11*. Это продиктовано тем, что как уже отмечалось выше, с изменением температуры электролита меняется его электропроводность, а следовательно, и плотность технологического тока. В противном случае обычный блок автоматики отреагирует на этот факт изменением величины МЭЗ, что в свою очередь нарушит точность профиля круга.

Результирующий сигнал с блока *12* усиливается усилителем *13*, и в зависимости от полярности этого сигнала электродвигатель вращается в одну или другую сторону, поддерживая (по мере износа круга и изменения электропроводности электролита) величину МЭЗ в заданных пределах. Практика использования предложенного способа в производственных условиях подтвердила его высокую эффективность.

Выводы и перспективы развития. Таким образом, проведенные исследования позволили в значительной мере решить проблему обработки труднообрабатываемых материалов, в том числе и поликристаллических сверхтвердых материалов на основе алмаза и плотных модификаций нитридов бора. В дальнейшем представляют интерес исследования напряженно-деформированного состояния системы «ПСТМ – алмазное зерно – связка круга» в условиях наложения ультразвуковых колебаний с целью установления на этой основе оптимальных режимов шлифования.

Список литературы

1. Грабченко, А. И. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования / А. И. Грабченко. – Харьков : Вища шк., 1985. – 184 с.
2. Грабченко, А. И. Повышение режущей способности токопроводящих алмазных кругов в комбинированных процессах шлифования ПСТМ / А. И. Грабченко, И. Н. Пыжов, Д. М. Алексеенко // Вісник Сумського державного університету. Серія «Технічні науки». – 2011. – Т. 1, № 1. – С. 105–116.
3. Точность производства в машиностроении и приборостроении / А. Н. Гаврилов, Н. А. Бородачев, Р. М. Абдрашитов [и др.] ; под ред. А. Н. Гаврилова. – М. : Машиностроение, 1973. – 567 с.
4. Грабченко, А. И. Особенности использования микропорошков алмаза в кругах на металлических связках / А. И. Грабченко, В. Л. Доброскок, И. Н. Пыжов, В. А. Федорович // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць / Донбаська державна машинобудівна академія. – Краматорськ : ДДМА, 2010. – Вип. 27. – С. 3–11.
5. Сизый, Ю. А. Основы научных исследований в технологии машиностроения : учеб. пособие / Ю. А. Сизый, Д. В. Сталинский. – Харьков : УкрГНТЦ «Енергосталь»; Изд-во САГА, 2007. – 212 с.
6. Кумабэ, Д. Вибрационное резание / Д. Кумабэ ; пер. с яп. С. Л. Масленникова ; под ред. И. И. Портнова, В. В. Белова. – М. : Машиностроение, 1985. – 424 с.
7. Федорович, В. А. Способы шлифования с комбинированным управлением режущим рельефом кругов / В. А. Федорович // Вестник ХГПУ. – 1999. – Вып. 45. – С. 26–28.
8. Семко, М. Ф. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов / М. Ф. Семко, А. И. Грабченко, М. Г. Ходоревский. – Харьков : Вища шк., 1980. – 192 с.
9. Марков, И. А. Ультразвуковая обработка материалов / И. А. Марков. – М. : Машиностроение, 1980. – 237 с.
10. Ящерицын, П. И. Профилирование алмазно-абразивных инструментов пластическим деформированием / П. И. Ящерицын, В. Д. Дорофеев, Г. Н. Гринин. – Саратов : Изд-во Сарат. ун.-та, 1982. – 112 с.

УДК 621.923

Федорович, В. А.

Обеспечение устойчивости процесса алмазного шлифования поликристаллических сверхтвердых материалов / В. А. Федорович, И. Н. Пыжов, Е. А. Бабенко, В. Г. Клименко // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 2. – С. 74–80.

Федорович Владимир Алексеевич
доктор технических наук, профессор,
Национальный технический университет «ХПИ»,
61000, Украина, г. Харьков, ул. Фрунзе, 21.
+380577001564
E-mail: fedorovich@kpi.kharkov.ua

Пыжов Иван Николаевич
доктор технических наук, профессор,
Национальный технический университет «ХПИ»,
61000, Украина, г. Харьков, ул. Фрунзе, 21.
+380577001564
E-mail: diamet@inbox.ru

Бабенко Евгений Александрович
аспирант,
Национальный технический университет «ХПИ»,
61000, Украина, г. Харьков, ул. Фрунзе, 21.
+380577001564
E-mail: eugen.babenko@gmail.com

Клименко Виталий Григорьевич
старший преподаватель,
Полтавский национальный технический университет
им. Ю. Кондратюка,
36011, Украина, г. Полтава, Первомайский проспект, 24.
E-mail: klim_poltava@mail.ru

V. Fedorovich
doctor of technical sciences, professor,
National Technical University «KPI»
61000, Ukraine, Kharkov, Frunze st., 21.
+380577001564
E-mail: fedorovich@kpi.kharkov.ua

I. Pyzhov
Dr. Sc. Science,
National Technical University «KPI»
61000, Ukraine, Kharkov, Frunze st., 21.
+380577001564
E-mail: diamet@inbox.ru

E. Babenko
a graduate student
National Technical University «KPI»
61000, Ukraine, Kharkov, Frunze st., 21.
+380577001564
E-mail: eugen.babenko@gmail.com

V. Klimenko
art. teacher,
Poltava National Technical University
named Yuri Kondratyuk,
36011, Ukraine, Poltava, Pervomajskij avenue, 24.
E-mail: klim_poltava@mail.ru

Аннотация. Приведены результаты теоретико-экспериментальных работ, посвященных разработке и исследованию прогрессивных комбинированных процессов шлифования, обеспечивающих устойчивость процесса обработки труднообрабатываемых материалов, в том числе и поликристаллических сверхтвердых материалов на основе алмаза и плотных модификаций нитридов бора.

Ключевые слова: обрабатываемый материал, комбинированный процесс шлифования, алмазный круг, рабочая поверхность круга, автономная зона, металлическая связка круга, правящий катод, ультразвуковые колебания, межэлектродный зазор.

Abstract. The results of theoretical and experimental work on the research and development of advanced composite grinding processes that sustain the processing of hard materials, including polycrystalline superhard materials based on diamond and dense modifications of boron nitride.

Key words: processed material, the combined process of grinding, diamond grinding wheel, the working surface of the circle, the autonomous zone, metal bond terms, the ruling cathode, ultrasonic vibration, the electrode gap.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ И ПРОИЗВОДСТВЕ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

УДК 001.891.5

АЛГОРИТМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ В ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ ПОДДЕРЖКИ УДАЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

А. М. Михеев, П. С. Краснощеков

Использование современных технически сложных объектов в различных научно-производственных сферах деятельности обязывает предпринимать меры по обеспечению их безопасного использования, а также мониторинга и контроля состояния. Проведение научно-исследовательских экспериментов на современных экспериментальных стендах для организации удаленного эксперимента, наиболее приближенного к реальной ситуации, является устойчивой мировой тенденцией. Об этом свидетельствуют огромное количество разработок, а также множество зарубежных и отечественных публикаций, посвященных решениям задач в области мониторинга и контроля удаленного физического объекта.

Стоимость организации современных экспериментальных стендов велика, а уровень развития современных телекоммуникационных технологий предоставляет широкие возможности, связанные с созданием распределенных информационных систем, поэтому задача создания и последующего использования систем поддержки удаленного эксперимента является весьма актуальной.

Совмещение аппаратно-программных систем с телекоммуникационными сетями и предоставление удаленного доступа к измерительному и управляющему оборудованию позволяет не зависеть от расстояния до удаленного физического объекта. Подобная интеграция двух технологий расширяет функциональные возможности систем, построенных на их основе [1].

Эффективность использования подобных систем для поддержки удаленных дистанционных экспериментов достигается благодаря возможности программным путем опираться на мощь современной компьютерной техники, при этом перестройка к изменяющимся требованиям значительно уменьшает затраты на материальное и программное обеспечение. Весьма важным является продвижение дистанционных технологий в лабораторные практикумы и в учебный эксперимент как с целью повышения эффективности, так и снижения материальных затрат на обучение в сфере инженерного образования.

Для проведения эффективных экспериментальных исследований следует использовать положения теории научного планирования эксперимента, факторного анализа, методов математической статистики, прогнозирования и поиска оптимальных решений.

Получение экспериментальных данных обеспечивает информационно-измерительная система, которая в реальных условиях имеет распределенную структуру, включающую в себя интеллектуальные многофункциональные датчики, унифицирующие измерительные преобразователи, средства хранения и цифровой обработки информации, соединенные между собой каналами связи.

Полученная измерительная информация наряду с накопленной ранее информацией и синтезированными на ее основе математическими моделями используется для идентификации состояний исследуемой сложной технической системы и протекающих в ней физических процессов и уточнения соответствующих математических моделей.

Удобным средством решения задачи идентификации состояний исследуемой системы и протекающих в ней процессов служит искусственная нейронная сеть (ИНС), а процесс ее обучения – средством хранения и уточнения соответствующих математических моделей.

Задача обучения ИНС формулируются следующим образом. Известен набор из m эталонных векторов размерностью n, описывающих состояние исследуемой сложной технической системы или протекающие в ней физические процессы [2]:

$$X_i^k = \{x_i^k : k = 0 \ldots m-1;\ i = 0 \ldots n-1\},$$

где x_i^k – элементы векторов обучающей выборки.

В процессе обучения ИНС необходимо при подаче k-го вектора

$$X_i^k = \{x_i^k :\ i = 0 \ldots n-1\}$$

обеспечить выходной сигнал сети

$$Y = \{y_i : i = 0 \ldots n-1\},$$

равный эталонному

$$Y = X^k.$$

В процессе обучения ИНС подбираются ее структура (число слоев нейронов, число нейронов в слое, их взаимосвязи и т.д.), а также параметры нейронов.

В процессе идентификации на вход ИНС подается вектор результатов измерений параметров сложной технической системы или протекающего в ней процесса, имеющий ту же размерность, что и эталонные векторы:

$$X_i^* = \{x_i^* :\ i = 0 \ldots n-1\}.$$

Необходимо в обучающей выборке определить вектор

$$X_i^k = \{x_i^k :\ i = 0 \ldots n-1\},$$

максимально близкий к исследуемому, и выдать его на выход ИНС

$$Y = X^k.$$

Если такой вектор определить не удается, необходимо выдать об этом сообщение.

Архитектура ИС ПНЭ представлена на рис. 1.

Разработанная интеллектуальная информационная система поддержки научного эксперимента (ИИС ПНЭ) обеспечивает:

– сбор и обработку измерительной информации;

– обмен данными между удаленным объектом и информационной системой;

– идентификацию состояний исследуемого физического объекта по совокупности накопленной информации с помощью нейронной сети;

– визуальный контроль состояния физического объекта через WEB-интерфейс;

– дистанционное управление измерительным экспериментом.

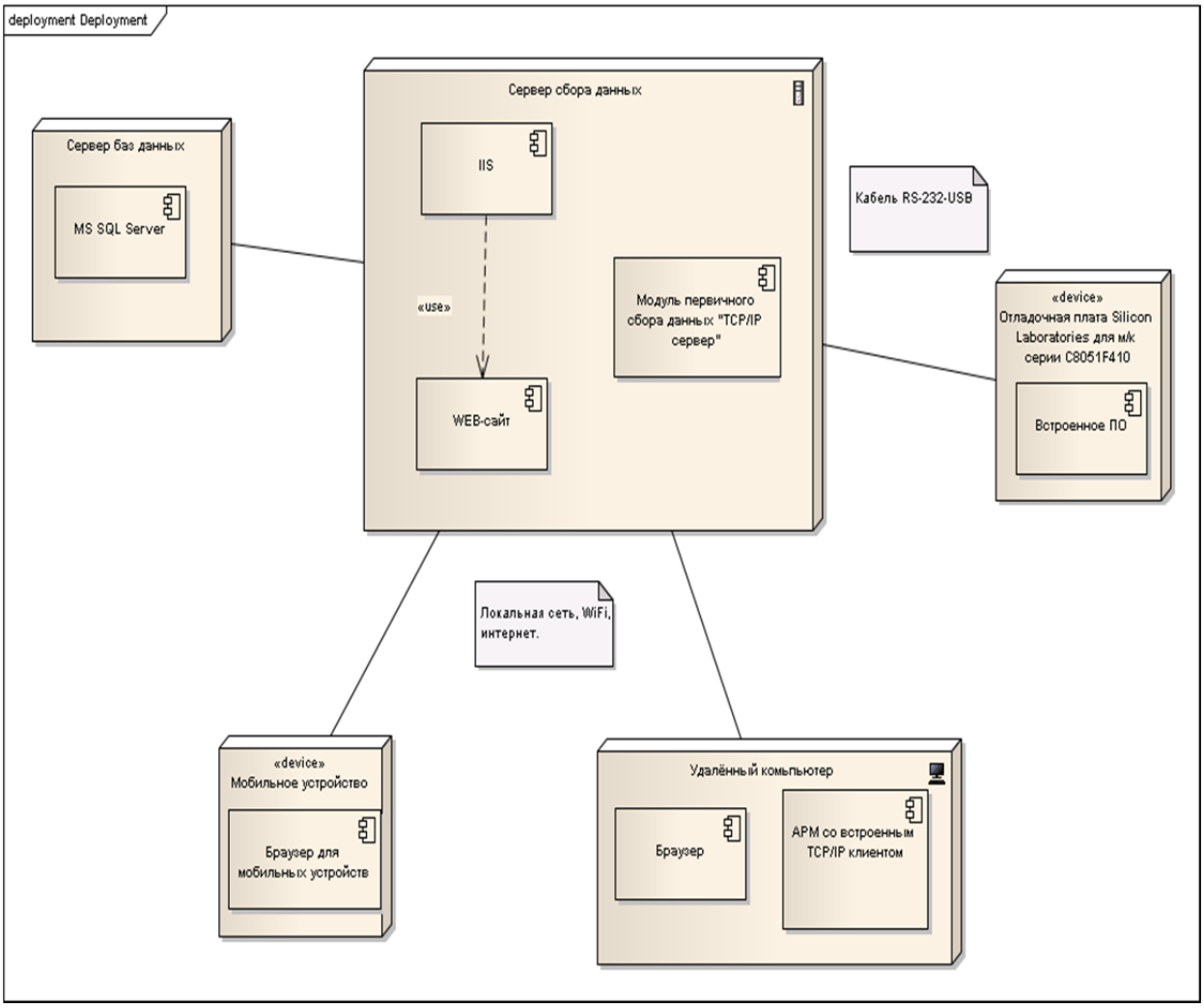


Рис 1. Архитектура ИС ПНЭ

К сожалению, ИНС относительно хорошо работают при хорошо проработанной обучающей выборке и относительно небольшом числе хорошо различающихся друг от друга ситуаций. Поэтому в настоящее время нейросетевая идентификация понимается как один из элементов технологии интеллектуального анализа данных *DataMining* [3].

Поскольку для передачи информации используется некий несущий сигнал, выполняющий функцию транспорта для доставки информации, измерительные данные с удаленного физического объекта системы сбора и обработки данных получают в виде цифрового сигнала. Однако измерительная информация, получаемая подсистемой сбора данных за относительно короткий промежуток времени, представляет собой только первичные или так называемые сырые данные о состоянии удаленного физического объекта. Следовательно, по первичной измерительной информации, за короткий промежуток времени можно произвести только первичную оценку его состояния, а дальнейшее прогнозирование его поведения невозможно по причине отсутствия необходимого количества данных.

Data Mining – новая технология интеллектуального анализа данных с целью выявления скрытых закономерностей в виде значимых особенностей, корреляций, тенденций и шаблонов. Современные системы добычи данных используют основанные на методах искусственного интеллекта средства представления и интерпретации, что и позволяет обнаруживать растворенную в терабайтных хранилищах не очевидную, но весьма ценную информацию. В основу технологии Data Mining положена концепция шаблонов, отражающих фрагменты многоаспектных взаимоотношений в данных. Эти шаблоны представляют собой закономерности, свойственные выборкам данных, которые могут быть компактно выражены в понятной человеку форме. Поиск шаблонов

производится методами, не ограниченными рамками априорных предположений о структуре, выборке и виде распределений значений анализируемых показателей.

Выделяют следующие стандартные типы:

– классификацию. Наиболее распространенная задача Data Mining. Она позволяет выявить признаки, характеризующие однотипные группы объектов для того, чтобы по известным значениям этих характеристик можно было отнести новый объект к тому или иному классу;

– последовательность. Подобно ассоциациям, последовательность имеет место между событиями, но наступающими не одновременно, а с некоторым определенным разрывом во времени;

– прогнозирование. Это особая форма предсказания, которая на основе особенностей поведения текущих и исторических данных оценивает будущие значения определенных численных показателей. В задачах подобного типа наиболее часто используются традиционные методы математической статистики (в частности, регрессия), а также нейронные сети;

– анализ отклонений. Выявление наиболее нехарактерных шаблонов.

При выявлении вышеназванных закономерностей Data Mining использует большое число различных методов или их различные комбинации.

В качестве первого направления развития средств Data Mining следует выделить методы статистической обработки данных, которые можно подразделить:

– на предварительный анализ природы статистических данных (проверка гипотез стационарности, нормальности, независимости, однородности, оценка вида функции распределения и ее параметров, выделение существенных качественных факторов (дисперсионный анализ);

– выявление связей и закономерностей (корреляционный, регрессионный анализ);

– многомерный статистический анализ (кластерный, дискриминантный, факторный);

– динамические модели и прогноз на основе временных рядов.

Важное положение Data Mining – нетривиальность разыскиваемых шаблонов. Это означает, что найденные шаблоны должны отражать неочевидные, неожиданные регулярности в данных, составляющие так называемые скрытые знания. К обществу пришло понимание, что сырые данные содержат глубинный пласт знаний, при грамотной раскопке которого могут быть обнаружены настоящие самородки.

Трансформация, нормализация данных. Это необходимо для методов, которые требуют, чтобы исходные данные были в каком-то определенном виде. Дело в том, что различные алгоритмы анализа требуют специальным образом подготовленные данные, например, для прогнозирования необходимо преобразовать временной ряд с помощью скользящего окна, или вычисление агрегируемых показателей.

Для возможности реализации методов прогнозирования состояния удаленного физического необходимо накопить измерительную информацию с объекта за большой промежуток времени. Для решения данной задачи в информационной системе поддержки удаленного эксперимента в качестве хранилища данных была разработана реляционная база данных.

База данных в информационной системе поддержки удаленного эксперимента выполняет функции систематизации результатов экспериментов. Упорядоченность информации в базе данных, помимо удобств доступа, ведет к значительному сокращению аппаратных ресурсов сервера баз данных, необходимых для ее обслуживания, которая достигается путем нормализации и целостности данных.

Разработка хранилища данных, полученных с удаленного источника информации, позволяет осуществить накопление измерительной информации за большой промежуток времени для возможности дальнейшего прогнозирования состояния контролируемого объекта. Однако полезной измерительной информацией, которая возможно является необходимой для прогнозирования состояния исследуемого объекта, в хранилище данных информационной системы поддержки удаленного эксперимента является часть от всей накопленной информации. Для выявления той полезной информации, по которой возможно произвести идентификацию дальнейшего состояния исследуемого объекта, было принято решение использовать технологии предобработки и трансформации данных, а затем технологию Data Mining, выявление полезной информации в «сырых данных».

Общий принцип построения решений, использующих Data Mining, заключается в создании соответствующей модели, в ее обучении и тестировании, а также в разработке приложения, применяющего созданную модель для прогнозирования значений неизвестных атрибутов. При этом про-

цессы создания и обучения модели включают обязательное использование большого по объему набора данных, для которых известны значения атрибутов и прогнозирование которых предполагается в данной модели. Перед созданием модели, предназначенной для реальной эксплуатации, иногда создается ее прототип, обучаемый на наборе данных меньшего объема, а другой набор предназначен для тестирования созданной модели или прототипа. После подготовки исходных наборов данных выбирается алгоритм Data Mining, параметры работы алгоритма и входные поля.

В информационной системе поддержки принятия решения было принято решение использовать следующие алгоритмы, входящие в состав MS SQL Server 2008:

– алгоритм последовательной кластеризации (Microsoft Sequence Clustering) сочетает анализ последовательности операций с кластеризацией, т.е. в отличие от обычных алгоритмов кластеризации он учитывает последовательность возникновения событий. Обычно алгоритмы кластеризации используются в тех случаях, когда нет абсолютно никаких предположений о характере взаимосвязи между данными, а результаты их применения нередко являются исходными данными для других алгоритмов, например, для построения деревьев решений. Обычно они осуществляют итеративный поиск групп данных на основании заранее заданного числа кластеров. Изначально центры будущих кластеров представляют собой случайным образом выбранные точки в *n*-мерном пространстве возможных значений (где *n* – число параметров). Затем все исходные данные перебираются и в зависимости от значений параметров помещаются в тот или иной кластер, при этом постоянно происходит поиск точек, сумма расстояний которых до остальных точек в данном кластере является минимальной. Эти точки становятся центрами новых кластеров, и процедура повторяется до тех пор, пока центры и границы новых кластеров не перестанут перемещаться. Данный алгоритм далеко не всегда приводит к результату, поддающемуся логическому объяснению; он просто позволяет определить различные группы объектов или событий. Кроме того, не всегда можно с первого раза точно угадать число кластеров, отражающее реально существующее число групп. Реализация выполнена на программной платформе Microsoft SQL Server 2008 (Developer edition) с установленными аналитическими службами;

– алгоритм поиска ассоциаций (Microsoft Association) обеспечивает эффективный метод нахождения корреляций в больших наборах данных за счет поиска наборов записей, появляющихся одновременно. На основании полученных сведений генерируются правила о том, какие категории записей должны появляться вместе с наибольшей вероятностью.

В процессе исследования были проведены работы:

– разработан электронный депозитарий, обеспечивающий хранение планов экспериментов и полученной в ходе них измерительной информации:

– в качестве структуры данных электронного депозитария использована распределенная реляционная база данных, обеспечивающая дистанционный доступ к структурированной измерительной информации посредством сети передачи данных intranet и Internet.

Доступ к панели управления интеллектуальной информационной системы контроля состояния технически сложного объекта осуществляется через локальную сеть или сеть *Internet* посредством браузера. На рис. 1 представлена диаграмма развертывания, показывающая взаимосвязи между подсистемами и как осуществляется доступ к информационной системе пользователей, а также аппаратные и программные средства, необходимые для ее функционирования.

Используемые аппаратные и программные платформы обеспечивают сохранность и целостность информации при полном или частичном отключении электропитания, аварии сетей телекоммуникации, полном или частичном отказе технических средств ИИС ПНЭ.

WEB-ориентированная подсистема управления содержит слой представления, который отвечает за реакцию подсистемы на действия пользователя. Он спроектирован по шаблону проектирования *Model View Controller* (*MVC*) [5], который является наиболее подходящим современным шаблоном проектирования пользовательского интерфейса, в качестве программной платформы разработки была использована классическая web-ориентированная технология ASP.NET MVC и современный объектно ориентированный язык программирования C# [6, 7].

Список литературы

1. Опыт ОАО «НИИФИ» в использовании прогрессивных материалов и технологий при изготовлении интеллектуальных датчиков, микроэлектромеханических систем для систем мониторинга и контроля технически сложных объектов / А. Г. Дмитриенко, И. В. Волохов С. И. Торгашин, М. В. Тюрин // Матема-

тическое моделирование в машино- и приборостроении : сб. науч. тр. Пенз. гос. ун-та. – Пенза, 2010. – Спецвып. № 4. – С. 90–111.
2. Имитационное моделирование процедуры нейросетевой идентификации двумерного радиолокационного сигнала/ В. А. Северин, А. А. Кузнецов, М. Ю. Михеев, И. Ю. Семочкина // Вопросы радиоэлектроники. – 2009. – Т. 4, № 4. – С. 114–120.
3. Михеев, А. М. Информационная система поддержки научного эксперимента / А. М. Михеев, С. А. Исаков // Современные информационные технологии : тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза : ПГТА, 2011. – № 14. – С. 119–122.
4. Барсегян, А. А. Технологии анализа данных. Data Mining, Visual Mining, Text Mining, OLAP / А. А. Барсегян, М. С. Куприянов, В. В. Степаненко, И. И. Холод. – СПб. : БХВ-Петербург, 2007. – С. 384.
5. Фаулер, М. Шаблоны корпоративных приложений / М. Фаулер. – М. : Вильямс, 2010. – С. 579.
6. Эспозито, Д. Microsoft ASP.NET 2.0 базовый курс / Д. Эспозито. – М. : Вильямс, 2007. – С. 688.
7. Информационно-измерительный лабораторный комплекс исследования теплоотводов электрорадиоэлементов / Н. В. Горячев, А. В. Лысенко, И. Д. Граб, Н. К. Юрков // Надежность и качество : тр. междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – Т. 2. – С. 239–241.

УДК 001.891.5

Михеев, А. М.

Алгоритмы интеллектуального анализа данных в информационной системе поддержки удаленного эксперимента / А. М. Михеев // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 2. – С. 81–86.

Михеев Алексей Михайлович
аспирант, кафедра конструирования и производства радиоаппаратуры, Пензенский государственный университет
440026, г. Пенза, ул. Красная, 40.
E-mail: dagas_88@mail.ru

Краснощеков Павел Сергеевич
доктор физико-математических наук, профессор, действительный член Российской академии наук, лауреат Премии СМ СССР,
главный научный сотрудник,
Учреждение Российской академии наук,
Вычислительный центр им. А. А. Дородницына,
119333, г. Москва, ул. Вавилова, 40.
8(499) 135-24-89

A. Mikheyev
graduate student,
chair of department construction
and the production of radio equipment,
Penza State University
440026, Penza, Red street, 40.
E-mail: dagas_88@mail.ru

P. Krasnoshchekov
doctor of physico-mathematical sciences, professor,
member of the Russian Academy of Sciences,
winner of the Prize of the USSR CM,
Chief Scientific Officer,
CCAS named A. A. Dorodnitsyn,
119333, Moscow, Vavilov st., 40.
8(499) 135-24-89

Аннотация. Рассматриваются возможности применения алгоритмов интеллектуального анализа данных в современных программно-аппаратных комплексах для поддержки научных экспериментов. Контроль объекта мониторинга осуществляется в рамках проведения научного эксперимента с помощью средств ИС ПНЭ, результаты фиксируются в базе данных.

Ключевые слова: интеллектуальные информационные системы, экспертные оценки, приобретение знаний.

Abstract. The article considers the capabilities using data mining algorithms in the modern software and hardware systems development for physical objects' state remote control. Object control is scientific experiment by means system', the results recorded in database.

Key words: intellectual information systems, expert estimates, acquisition of knowledge.

УДК 629.73.08

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ТРЕНАЖЕРАХ

Э. В. Лапшин

Анализ моделей информационных структур предполагает возможность объединения, разделения и модификации отдельных элементов без их влияния на систему в целом [1–5]. При модульной архитектуре систем модули могут создаваться независимо друг от друга и объединяться в блоки для получения необходимых результатов. Модули пилотажных приборов, силовой установки, подвижности, кабина, вычислитель, пульт инструктора и другое уже используются в современных тренажерах. Так, во многих пилотажных приборах используются аналоговые данные, а в ряде других приборах и вычислителях используются цифровые данные. Налицо обмен в тренажерах большими потоками различной информации. Наибольшие трудности связаны с необходимостью выполнения всех операций в реальном масштабе времени.

Описание и постановка задачи

Анализ показал, что модульный подход, облегчая некоторые трудности, налагает дополнительные ограничения, связанные с приведением данных в совместимую форму, на систему в целом. Однако если указанные проблемы будут решены, то присущая модульному подходу гибкость будет значительно перекрывать указанные ограничения по обработке данных. Вычисления могут распределяться между разными процессорами.

При таком подходе модули и интерфейс могут рассматриваться с функциональной точки зрения (*логический уровень*) или система рассматривается как набор аппаратных и программных модулей (*физический уровень*). Указанное разделение позволяет достичь основной цели – разделить указанные уровни так, чтобы изменения на одном уровне не вызывали изменений на другом. Так, можно модернизировать модули акселерационных эффектов, визуализации, установить другие ЭВМ и т.д. без изменения логической структуры АТ или, наоборот, использовать различные элементы физического уровня для создания конкретных АТ.

Разработка и анализ информационных процессов при взаимодействии модулей являются решением задачи передачи данных от модуля к модулю [6]. Для их связи необходима схема сопряжения (в идеале – универсальная).

Специального рассмотрения при модульном подходе требует вопрос программного обеспечения. Наибольшие усилия затрачены на обеспечение мобильности программного обеспечения. Доля стоимости математического обеспечения в общей стоимости АТ постоянно возрастает. Поэтому повышение эффективности труда программиста становится все более важным.

Во избежание сложности внедрения технических новшеств требования к модулям, интерфейсу и другим не должны быть чрезмерно жесткими и замыкаться на существующих технологиях. Залог успеха – в создании достаточно гибких модулей и системы в целом. Модуль должен определяться функционально. Типы используемых ЭВМ, длина слов, язык программирования и т.п. не должны входить в определение модуля. При определении модулей, интерфейса, утверждении стандартов (для исключения разногласий) головная организация, координируя деятельность подрядчиков, должна исполнять и роль эксперта.

Методы решения задач

Ограничимся рассмотрением модульного построения архитектуры комплексного тренажера на примере тренажера самолета Ту-204. В состав тренажера входят:

– кабина с рабочими местами двух пилотов, бортинженера и инструктора, устанавливаемая на шестистепенном стенде имитатора акселерационных эффектов;

– базовый вычислитель, включающий ЭВМ и устройство комплексирования;

– модуль информационного обмена, состоящий из стоек абонентских терминалов, расположенных вне кабины и в кабине;

– модуль имитатора визуальной обстановки, включающий генератор изображения и модуль отображения визуальной обстановки;

– рабочее место инструктора вне кабины тренажера;

– две стойки с бортовыми цифровыми вычислительными машинами;

– модуль имитатора метеонавигационной радиолокационной станции МНРЛС-85;

– модуль общего электропитания с автономным комплектом первичного электропитания для базового вычислителя тренажера;

– модуль кондиционирования воздуха в кабине тренажера.

На рис. 1 приводится модульная структура комплексного тренажера самолета Ту-204. Возможны два варианта модульного построения АТ. В первом (связи показаны *сплошными линиями*) к каждому ВК через интерфейс типа «Общая шина» подключается контроллер одной стойки абонентских терминалов с модулями СИО и используемым бортовым оборудованием. К каждой стойке абонентских терминалов бортовое оборудование подключается с учетом задач, решаемых вычислительным комплексом. Например, в ВК2 решаются задачи модуля динамики полета, системы дистанционного управления, автоматической системы штурвального управления.

К стойке абонентских терминалов, взаимодействующих с ВК2, подключаются органы управления полетом, бортовое оборудование (систем, связанных с ВСУП, ВСУТ, СПКР, СППЗ) и модуль имитатора акселерационных эффектов. Для уменьшения запаздывания к общей шине ВК 2 подключается модуль имитации визуальной обстановки. Здесь возможно создание тренажера из функционально законченных модулей:

– пилотажного модуля (включает ВК 2, ВК 3, две стойки абонентских терминалов и соответствующее оборудование);

– модуля бортинженера (включает ВК 4, стойку абонентских терминалов, приборы, органы управления, сигнализаторы силовой установки, бортовых систем контроля двигателей, топливной системы, системы регулирования давления, КИСС);

– модуля самолетовождения (включает ВК 5, стойку абонентских терминалов, бортовое оборудование системы самолетовождения и радиотехнических систем; к общей шине ВК 5 подключается имитатор МНРЛС-85);

– модуля инструктора (включает ВК 1, стойку абонентских терминалов, оборудование рабочего места инструктора).

Такое построение позволяет разрабатывать и специализированные тренажеры (естественно, с объемом решаемых задач, меньшим, чем в комплексном АТ). Запаздывание от управляющего воздействия от штурвала до изменения изображения в имитаторе визуальной обстановки определяется запаздыванием собственно имитатора визуальной обстановки и 1–2 циклами решения задач.

Во втором варианте (связи показаны *пунктирными линиями*) контроллеры стоек абонентских терминалов подключаются не к интерфейсу «Общая шина» ВК1 – ВК5, а к магистрали МПД (подключается к одному из входов общего поля памяти ОЗУ). Здесь устройство комплексирования ОЗУ, кроме функций обмена данными между ВК1 – ВК5, выполняет функции приема и передачи данных от оборудования кабины и рабочего места инструктора. Это позволяет создать гибкую структуру вычислительной системы тренажера, обеспечивающую перераспределение потоков информации (позволяет уменьшить количество коммутирующих средств). Эксплуатационная надежность тренажера во многом определяется надежностью устройства комплексирования (отказ устройства приведет к отказу тренажера в целом).

С учетом изложенного выше очевидна целесообразность построения тренажера по первому варианту, что практически и реализовано.

Ограничимся рассмотрением основных модулей.

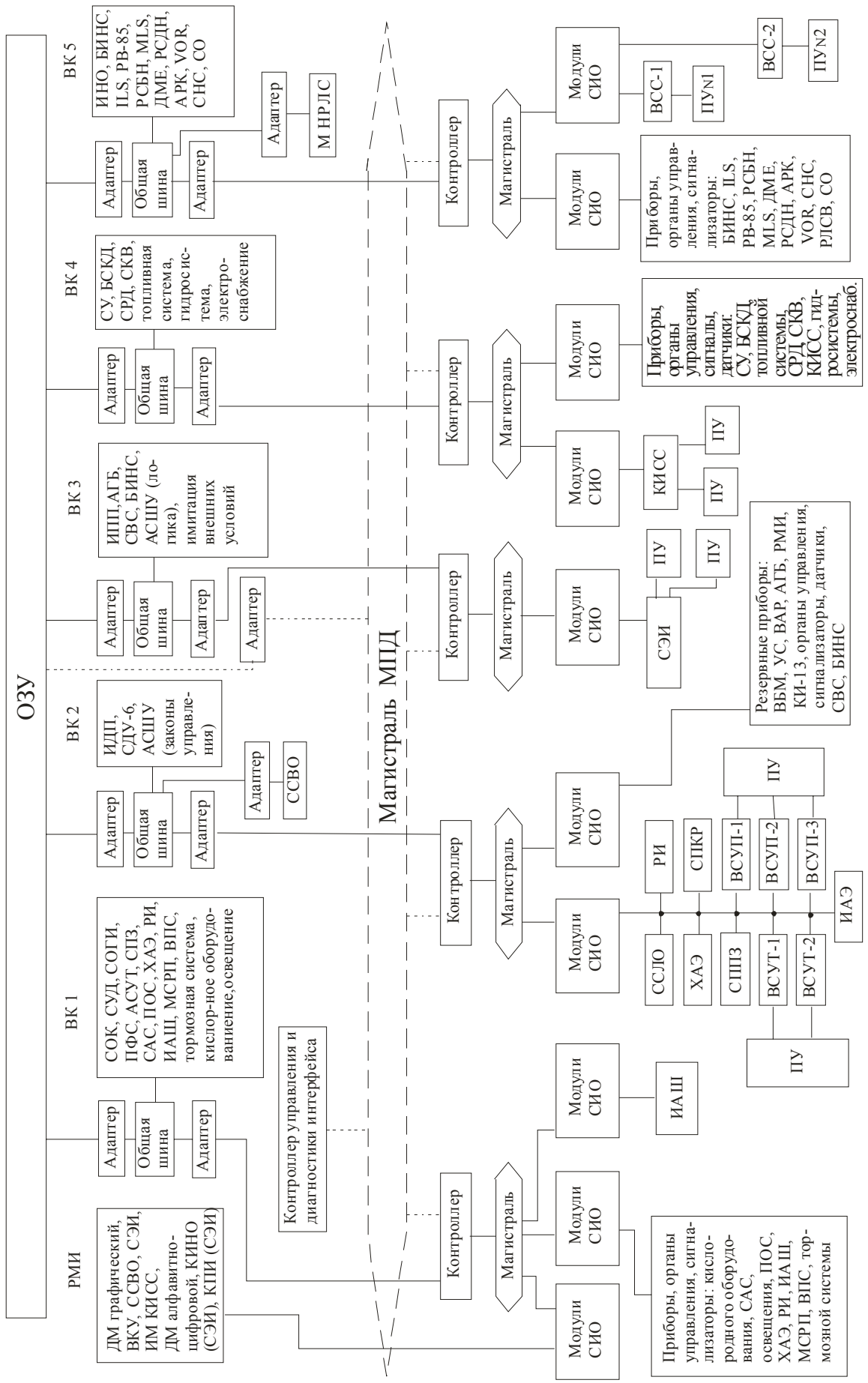


Рис. 1. Структурная схема комплексного тренажера самолета

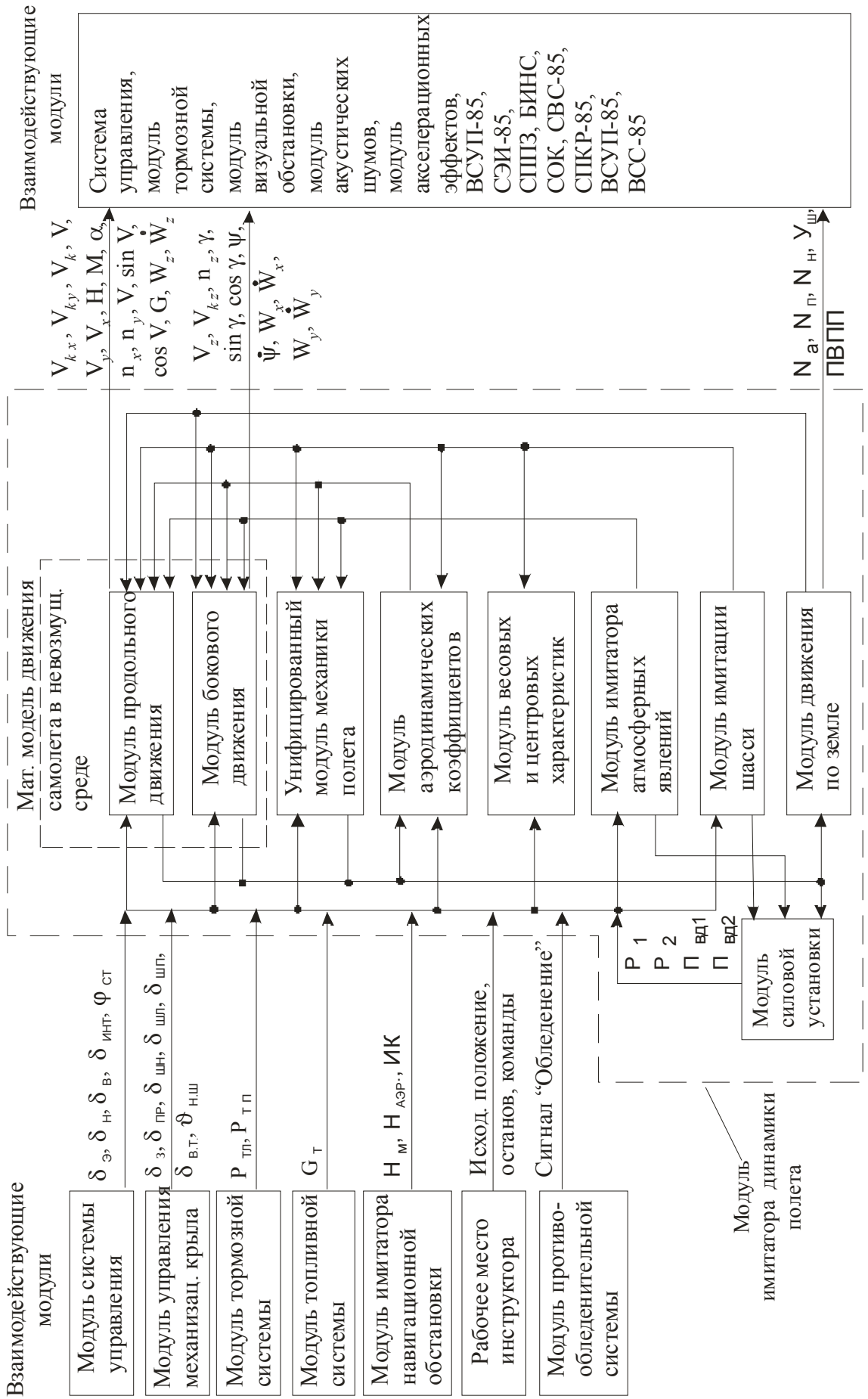


Рис. 2. Структурная схема модуля имитатора динамики полета

Модуль имитатора динамики полета. Структурная схема с указанием взаимосвязей с другими имитаторами приводится на рис. 2.

Воспроизводится движение самолета в пространстве (решение замкнутой системы нелинейных дифференциальных уравнений; входные параметры – управляющие воздействия экипажа, выходные – параметры полета).

Моделируются [6]:

– движение по ВПП и рулежным дорожкам;

– взлет и набор высоты;

– полет по маршруту, снижение и заход на посадку;

– уход на второй круг (с использованием средств комплекса стандартного пилотажно-навигационного оборудования);

– экстренное снижение;

– полет по кругу, заход на посадку и посадка;

– пробег по ВПП с использованием всех средств торможения;

– полет при опасных внешних воздействиях.

Учитываются*:*

– температура воздуха и атмосферное давление;

– высота (уровень местности) аэродрома;

– горизонтальная составляющая скорости ветра;

– сдвиг и порывы ветра (вертикальный и горизонтальный);

– обледенение (изменение аэродинамических характеристик);

– состояние ВПП;

– сила тяжести и центровка самолета;

– режимы работы силовой установки (включая реверс);

– положение управляющих поверхностей, механизация крыла, шасси (при движении по земле учитываются характеристики устойчивости и управляемости; коэффициенты увода и трения колес с учетом состояния ВПП, торможения колес и работы антиюзового устройства);

– аэроупругость.

Для обеспечения подобия реального и моделируемого полета самолета осуществляется непрерывное вычисление параметров полета в реальном масштабе времени. Экипажу с соответствующих модулей предоставляются визуальная, акустическая, акселерационная информация, показания приборов пилотажно-навигационного комплекса, положения и усилия на органах управления (формируемых в соответствии с параметрами, получаемыми в имитаторе динамики полета (ИДП)).

Производится декомпозиция системы уравнений движения (продольное и боковое движения, движение по земле, модуль аэродинамических коэффициентов).

Шаг интегрирования задается из условий устойчивости и мощности ЭВМ.

Предусматривается возможность программного ввода и вывода значений физических параметров на дисплей.

Метод моделирования позволяет обеспечить воспроизведение динамических характеристик в полном соответствии с «Нормами годности авиационных тренажеров для подготовки авиационного персонала воздушного транспорта».

Модуль имитатора акселерационных эффектов. Предназначается для воспроизведения составляющих акселерационного поля информации, связанных с изменениями линейных перегрузок, угловых ускорений и перемещений, характерных для различных режимов полета, а также воспроизведения эффектов:

– постоянного ненаправленного «фонового» движения в процессе всего полета;

– вибрации от работающих двигателей;

– шумов от выпуска и уборки шасси;

– обжатия стоек шасси при торможении, растормаживании, а также эффектов, вызванных их касанием ВПП, включая раздельное касание носовой, левой и правой стойками;

– тряски при движении по ВПП;

– сваливания.

Позволяет одновременно имитировать пространственное маневрирование и движение, вызванное внешним воздействием.

Разработка динамических стендов (включая системы управления ими) осуществляется на основе компромисса между возможно более точным моделированием (в наземных условиях) акселерационных ощущений летчика и жесткими техническими ограничениями на максимальные линейные (в меньшей степени – на угловые) перемещения кабины стенда (во много раз меньшие реальных перемещений самолета). Точное моделирование акселерационных ощущений летчика во всем диапазоне частот принципиально невозможно – по линейным степеням свободы, а по угловым – затруднительно. Противоречие устраняется с использованием особенностей восприятия перегрузок летчиком. В имитаторе акселерационных эффектов воспроизводятся частоты 0,3–3 Гц. Задаваемые перемещения определяются с учетом их допустимого диапазона (независимо от способа формирования управляющих сигналов).

Для того чтобы при моделировании низких частот в изменении перегрузки кабина тренажера не только не выходила за ограничения по перемещению, но и незаметно для летчика стремилась вернуться в среднее, нейтральное положение, используются фильтры верхних частот. Воспроизведение на стенде длительно действующих линейных, боковых и продольных перегрузок (в диапазоне не более ±0,5g) обеспечивается возможностью наклона кабины на соответствующий угол. При разработке имитатора используются основы формирования ощущений наклонов у человека по реакциям отолитов, тактильных и кинестетических рецепторов. При разгоне и торможении самолета результирующая массовых сил, действующая на рецепторы, вызывает ощущение наклона по тангажу. Кабина тренажера наклоняется на соответствующий угол тангажа (линия горизонта на экране перед летчиком не изменяет своего положения). Аналогично строится имитатор для боковых перегрузок.

При имитации длительно действующих перегрузок учитывается взаимное расположение отолитового аппарата (в районе головы летчика) и центра вращения самолета (отолиты воспринимают перегрузки от возникающих при вращении центробежных сил). Одновременно с вращением подвижной платформе задаются линейные перемещения. Как в канале крена, так и тангажа используются фильтры (табл. 1).

Таблица 1

Рабочие характеристики динамического стенда

Параметр движения	Диапазон перемещения	Максимальная скорость	Максимальное Ускорение
Продольное (X)	± 0,6 м	± 0,8 м/с	± 8 м/с^2
Вертикальное (Y)	± 0,5 м	+0,7 ÷ 0,8 м/с	± 8 м/с^2
Боковое (Z)	± 0,6 м	± 0,8 м/с	± 8м/с^2
Крен (γ)	± 24 град	± 20 град/с	± 100 град/с^2
Гангаж (ϑ)	± 21 град	± 20 град/с	± 100 град/с^2
Рыскание (ψ)	± 23 град	± 20 град/с	± 100 град/с^2

Заключение

1. Предлагается анализ моделей информационных структур создания авиационных тренажеров модульной архитектуры с использованием системного подхода.

2. Приводятся структура, состав, а также указываются взаимосвязи информационно-вычислительных систем тренажеров, предусматривающих распараллеливание вычислительных процессов.

3. Предлагаются варианты модульного построения тренажеров.

4. Результаты исследований использованы при разработке динамических стендов и комплексных тренажеров самолетов, широко используемых для подготовки летного состава в учебно-тренировочных центрах. Приведенные принципы разработки авиационных тренажеров могут использоваться при проектировании и других управляемых в пространстве динамических систем.

Список литературы

1. Анисимов, А. Н. Методологические принципы проектирования сложных управляемых в пространстве динамических систем в приложении к разработке авиационных тренажеров / А. Н. Анисимов, А. М. Данилов, И.А. Гарькина [и др.] // Идентификация систем и задачи управления SICPRO`04 : сб. тр. III Меж-

дунар. конф. (г. Москва, 28–30 января 2004 г.). – М. : ИПУ РАН им. В. А. Трапезникова, 2004. – С. 279–311.
2. Данилов, А. М. Динамика и управление внеатмосферными астрономическими обсерваториями / А. М. Данилов, Л. З. Дулькин, А. С. Земляков и др. // Труды VI Международного симпозиума ИФАК по управлению в пространстве : в 2 т. – М. : Наука, 1976. – Т. 1. Управление в пространстве. – С. 153–171.
3. Данилов, А. М. Модульная архитектура пилотажных авиационных тренажеров на базе ПЭВМ / А. М. Данилов, Э. В. Лапшин, В. Н. Шихалеев // Тренажеры и компьютеризация профессиональной подготовки : сб. тр. III Всесоюз. науч.-техн. конф. – Калининград, 1991.
4. Гарькина, И. А. Системная методология идентификации сложных динамических систем. Аэрокосмические приложения / И. А. Гарькина, А. М. Данилов, А. П. Прошин // Аэрокосмические приборные технологии : сб. материалов III Междунар. симп. (г. Санкт-Петербург, 2–4 июня 2004 г.). – СПб., 2004.
5. Данилов, А. М. Теория и практика имитационного моделирования и создания тренажеров / А. М. Данилов, Э. В. Лапшин // Приборы и системы управления. – 1989. – № 8.
6. Лапшин, Э. В. Математическое моделирование динамики полета летательного аппарата : моногр. / Э. В. Лапшин, А. А. Красовский, Н. К. Юрков ; под ред. Э. В. Лапшина. – Пенза : Изд-во Пенз. филиала РГУ ИТП, 2008. – 260 с.

УДК 629.73.08
Лапшин, Э. В.
Исследование информационных процессов, протекающих в тренажерах / Э. В. Лапшин // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 2. – С. 87–93.

Лапшин Эдуард Владимирович
доктор технических наук, профессор,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
440026, г. Пенза, ул. Красная, 40.
(841-2) 56-43-46,
E-mail: kipra@pnzgu.ru

Аннотация. Предлагается анализ моделей информационных структур создания авиационных тренажеров с использованием информационно-вычислительных комплексов с распараллеливанием вычислительных процессов в реальном масштабе времени. Приводится их реализация при разработке тренажера транспортного самолета.

Ключевые слова: исследование информационных структур, авиационные тренажеры, сложные человеко-машинные системы, многопотоковая обработка данных, модульная архитектура, многопроцессорные вычислительные комплексы.

E. Lapshin
doctor of technical science, professor,
chair of department construction
and the production of radio equipment
Penza state university
440026, Penza, Red street, 40.
(841-2) 56-43-46
E-mail: kipra@pnzgu.ru

Abstract. Presents an analysis of models of information structures to create simulators, using information and computer systems with parallel computing processes in real time. Their implementation is given in the development of transport aircraft simulator.

Key words: study of information structures, aerotional simulators, complex human-machine systems, multithreaded processing, the modular architecture, multiprocessor compute-inflammatory complexes.

УДК 681.5.015.63:62-192

СТРАТЕГИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ПРОЕКТНОГО РЕШЕНИЯ

Я. В. Катуева

Введение

Функционально-параметрический (ФП) подход [1] естественным образом следует из общепринятого определения надежности как свойства объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих его способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, хранения и транспортирования [2]. В соответствии с этим определением подход для оценки надежности должен отражать связь показателей надежности с выполняемыми объектом функциями, условиями эксплуатации и временем.

В основу ФП-подхода положены следующие основные принципы:

– процесс функционирования объекта и его техническое состояние в любой момент времени определяется конечным набором некоторых переменных – параметров объекта;

– отказы являются следствием деградационных изменений параметров;

– формой проявления отказа является выход параметров за пределы области допустимых значений (области работоспособности);

– если процессы изменения параметров наблюдаемы, прогнозируемы и управляемы, то существует принципиальная возможность предотвращения отказов [1].

В рамках ФП-подхода задачи расчета и обеспечения надежности, возникающие на этапах проектирования, производства и эксплуатации, взаимосвязаны: все они могут быть представлены как разновидности задачи управления случайными процессами. Их решение должно основываться на результатах прогнозирования процессов изменения параметров (технического состояния) и надежности исследуемых объектов. При разработке методов прогнозирования и управления необходимо учитывать как специфику случайных процессов дрейфа параметров (они относятся к классу нестационарных и локально управляемых), так и особенности самого управления, которое имеет вид импульсной коррекции [3].

Математическая и вычислительная сложность методов оптимального синтеза технических систем с учетом закономерностей случайных вариаций их параметров и требований надежности, трудность получения необходимой исходной информации о параметрических возмущениях породили определенный пессимизм в отношении практической полезности (конструктивности) методов ФП-подхода.

Однако быстрое развитие вычислительных мощностей, использование технологий параллельных, распределенных, облачных высокопроизводительных вычислений позволяют говорить о возрождении многих, ранее считавшихся чисто теоретическими методов и алгоритмов и дают возможность эффективному практическому применению функционально-параметрического подхода для оптимизации надежности по постепенным (деградационным) отказам.

В работе предлагается предварительная процедура параметрического синтеза, позволяющая в дальнейшем уменьшить вычислительные расходы путем выявления проектных решений, не соответствующих требованиям качества, и выбора наиболее эффективных для нахождения оптимального решения стратегий и процедур поиска.

Задача параметрического синтеза

В качества объекта проектирования в работе рассматриваются аналоговые радиоэлектронные устройства (РЭА).

Синтез технических объектов включает в себя две основные части: формирование структуры объекта (структурный синтез) и выбор значений внутренних параметров (параметрический

синтез). Общая постановка задачи оптимального параметрического синтеза может быть сформулирована следующим образом [1, 4, 5].

Определены структура объекта (схема РЭА) и соответствующая ей математическая модель – функциональная зависимость выходных параметров $\boldsymbol{y} = \{y_j\}_{j=1}^{m}$ от параметров элементов

$$y_j = F_j(x_1, ..., x_n), \tag{1}$$

где $F_j(\bullet)$ – функция, зависящая от топологии исследуемой системы. Возможные вариации значений внутренних параметров задаются из условий их физической реализуемости и представляют собой брус допусков

$$B_T = \{a_i^0 \le x_i \le b_i^0, i = \overline{1, n}\}. \tag{2}$$

Показателем качества функционирования системы является выполнение условий работоспособности, задаваемых обычно в виде допусков на выходные параметры (системы неравенств)

$$\mathbf{y}_{\min} \le \mathbf{y}(\mathbf{x}) \le \mathbf{y}_{\max}. \tag{3}$$

Отображение условий работоспособности в пространство внутренних параметров задает в нем область работоспособности (ОР) $D_{\boldsymbol{x}}$:

$$D_x = \left\{\mathbf{x} \in R^n \mid \mathbf{y}_{\min} \le \mathbf{y}(\mathbf{x}) \le \mathbf{y}_{\max}\right\}. \tag{4}$$

Задача оптимального параметрического синтеза (ОПС) технических устройств и систем состоит в выборе номинальных значений $\mathbf{x}_{\text{nom}} = (x_{1\text{nom}}, x_{2\text{nom}}, ..., x_{n\,\text{nom}})^T$ внутренних параметров исследуемого устройства, обеспечивающих максимум вероятности невыхода траектории случайного процесса деградации параметров за пределы области работоспособности в течение заданного интервала времени:

$$\mathbf{x}_{\text{nom}} = \arg\max P\{X(\mathbf{x}_{\text{nom}}, t) \in D_{\mathbf{x}}, \mathbf{x}_{\text{nom}} \in B_T \cap D_{\mathbf{x}}, \forall t \in [0, T]\}, \tag{5}$$

где $\mathbf{X}(\mathbf{x}_{\text{nom}}, t)$ – случайный процесс деградации параметров, включая деградацию под воздействием внешних условий; D_x – область работоспособности; T – заданное время эксплуатации устройства.

В задачах проектирования электронных схем, при достаточной их сложности построить модель (1) в аналитическом виде практически невозможно [1]. Функции, описывающие проектируемую систему, имеют сложный нелинейный характер, поэтому соотношения (1) задаются в алгоритмическом виде или с помощью имитационной модели типа «черного ящика» с использованием программных пакетов моделирования электрических цепей. Это не позволяет получить оптимальное решение задачи (5) в аналитической форме с помощью классических методов оптимизации порядка выше нулевого.

Для решения задачи оптимального параметрического синтеза необходима следующая исходная информация:

1) условия работоспособности – требуемые соотношения между выходными параметрами и техническими требованиями (3);

2) множество возможных (из условий физической реализуемости) значений внутренних параметров B_T;

3) математическая модель объекта, представляющая собой некоторые соотношения, связывающие выходные параметры системы с внутренними, или область работоспособности D_x, являющаяся отображением условий работоспособности в пространство внутренних параметров;

4) статистические данные о закономерностях производственных и эксплуатационных изменений (деградации) внутренних параметров.

Задачу ОПС в виде (5) можно рассматривать как стандартную задачу математического программирования с ограничениями. Ее особенностями являются многомерность, стохастичность, нелинейность, невыпуклость, многоэкстремальность.

Предварительная процедура уменьшения области поиска и оценки качества проектного решения

В качестве первого этапа ОПС в рамках функционально-параметрического подхода предлагается процедура уменьшения области поиска и оценки качества проектного решения. Проектным решением будем называть заданную структуру объекта, ограничения на внутренние (варьируемые) параметры и условия работоспособности.

Формой проявления отказа является выход внутренних параметров за пределы области работоспособности в результате деградации. Следовательно, определенной характеристикой возможности системы выполнять заданные функции в условиях параметрических возмущений является область работоспособности D_x, построенная в координатах параметров схемных элементов системы. Совокупность значений внутренних параметров является точкой в n-мерном пространстве этих параметров, а расстояние от нее до границы области работоспособности ∂D_x может рассматриваться как некоторый запас сохранения качества функционирования системы [6].

Прежде всего необходимо убедиться, что множество значений внутренних параметров D_x, при которых выполняются условия работоспособности (4), заданные техническим заданием, не пусто, т.е.:

$$B_T \cap D_{\mathbf{x}} \neq \varnothing. \tag{6}$$

Для получения характеристик области работоспособности предлагается провести предварительную процедуру, основанную на методе статистических испытаний, описанную в [7], и построить для области работоспособности описанный параллелепипед в границах бруса допусков (2).

Описанным параллелепипедом для области работоспособности D_x называют область в пространстве внутренних параметров, представляющую собой n-мерный ортогональный параллелепипед со сторонами, параллельными осям координат

$$B_0 = \{\mathbf{x} \in R_n \mid a_i^0 \le x_i \le b_i^0,\, i = \overline{1,n}\}, \tag{7}$$

с объемом

$$V_0 = \prod_{i=1,n} (b_i^0 - a_i^0), \tag{8}$$

где $a_i^0 = \min\limits_{\mathbf{x} \in D_x \cap B_T} x_i$; $b_i^0 = \max\limits_{\mathbf{x} \in D_x \cap B_T} x_i$.

Построение описанного вокруг неизвестной области D_x n-мерного параллелепипеда позволит уменьшить область поиска и отбросить из рассмотрения те ее части, в которых точки ОР отсутствуют или образуют множества, которыми можно пренебречь.

После проведения N испытаний в брусе допусков вычисляется оценка объема области работоспособности:

$$\hat{V}_g = V_T N_g / N, \tag{9}$$

где V_T – объем бруса допусков; N_g – число точек, попавших в область работоспособности; N – число испытаний.

Соотношение полученной оценки объема области работоспособности и объема описанного параллелепипеда

$$K_V = \hat{V}_g / V_0 \tag{10}$$

позволяет судить о степени «заполненности» описанного параллелепипеда находящейся внутри него областью работоспособности.

Использование предварительной процедуры [7] позволяет получить важные данные для анализа качества проектного решения:

1) границы $\mathbf{a}^0, \mathbf{b}^0$ описанного бруса B_0;

2) точки касания $K_i^-, K_i^+, i = \overline{1,n}$ области работоспособности и описанного бруса, через которые построены границы описанного бруса;

3) оценку объема $\hat{V}_g$ области работоспособности и коэффициент K_V степени заполненности областью работоспособности описанного параллелепипеда B_0.

Данный коэффициент (10) позволяет сделать следующие выводы о качестве проектного (структурного) решения.

1. Если $N_g = 0,$ то $K_V = 0, \Rightarrow B_T \cap D_x = \varnothing$.

Условия работоспособности не выполняются ни в одной точке бруса допусков, т.е. область работоспособности не пересекается с брусом допусков. Это говорит о том, что исследуемая система ни при каких значениях параметров элементов из заданного множества B_T не удовлетворяет условиям качества функционирования.

Если множество B_T достаточно «широко» в плане возможных реализуемых значений параметров (включает в себя как минимум несколько значений стандартных рядов типономиналов параметров), то данная ситуация говорит о плохом качестве проектного (структурного) решения и необходимости изменить структуру системы.

2. Если $K_V \leq 0{,}1$, то область работоспособности D_x в брусе допусков очень мала и имеет сложную геометрическую конфигурацию (возможно, она неодносвязна). Обеспечить достаточный интервал приемлемых значений параметров при данной структуре системы невозможно. Проведение дальнейших процедур ОПС в таком случае малоцелесообразно.

3. Если некоторые границы бруса допусков (2) и описанного параллелепипеда практически совпадают, то часть области работоспособности может находится за пределами границ B_T. В этом случае, если соотношение K_V достаточно мало, можно изменить условия (2) для совпадающих границ, расширив в данном направлении область B_T и провести процедуру построения описанного параллелепипеда еще раз.

4. Если соотношение K_V достаточно мало, то это свидетельствует о неодносвязности или вытянутости геометрической конфигурации области работоспособности. Может получиться, что для одного или нескольких параметров пределы их возможных вариаций будут слишком малы, что не сможет обеспечить достаточной вероятности безотказной работы проектируемого устройства либо потребует высокой точности при его изготовлении и использовании специальных электрорадиоэлементов, малочувствительных к внешним воздействиям и слабо подверженных процессам старения, что существенно увеличит стоимость изделия.

5. Если $K_V > 0{,}9$, то в этом случае точка пересечения диагоналей B_0

$$\mathbf{x}_c^B = \left(\frac{b_1^0 - a_1^0}{2}, \ldots, \frac{b_n^0 - a_n^0}{2}\right) \tag{11}$$

может быть принята в качестве оптимального решения задачи ПС.

Быстрый анализ области работоспособности с использованием характеристических точек

Прежде чем переходить к дальнейшим дорогостоящим в вычислительном плане процедурам ОПС, следует провести анализ области работоспособности. Хотелось бы оценить ее форму и конфигурацию в пространстве внутренних параметров, а также попытаться сделать предположения о выпуклости и односвязности области. Так, например, для выпуклых областей работоспособности и симметричной относительно математического ожидания функции распределения плотности вероятности параметров задача (5) сводится к поиску центра тяжести области работоспособности D_x [8].

Координаты центра тяжести (центроида) множества точек $\{\mathbf{x}_j, j = \overline{1, N_g}\}$, попавших в область работоспособности $D_\mathbf{x}$, вычисляются в ходе процедуры [4] по формуле

$$\mathbf{x}_c = \left(\frac{\sum_{j=1}^{N_g} x_{1_j}}{N_g}, \ldots, \frac{\sum_{j=1}^{N_g} x_{n_j}}{N_g}\right) \tag{12}$$

и являются с определенной долей вероятности приближением центра тяжести самой ОР.

Для множества точек касания $K=\{ K_i^-, K_i^+, i=\overline{1,n} \}$ может быть вычислен центроид:

$$\mathbf{x}_c^K = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(K_{i\,1}^+ + K_{i\,1}^-\right)}{2n}, \ldots, \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(K_{i\,n}^- + K_{i\,n}^+\right)}{2n} \right). \quad (13)$$

Назовем полученные в результате предварительной процедуры [4] точки касания $K_i^-, K_i^+, i=\overline{1,n}$, точку центра тяжести множества точек, попавших в ОР в процессе статистических испытаний $\mathbf{x}_c$, и точку $\mathbf{x}_c^K$ характеристическими точками области работоспособности.

На следующем этапе необходимо проверить принадлежность точек-центроидов области работоспособности. Если условия работоспособности не выполняются в точках $\mathbf{x}_c$ и $\mathbf{x}_c^K$, то предположение о выпуклости и односвязности ОР не верно (центр тяжести области не принадлежит самой области). Это означает, что ОР имеет достаточно сложную конфигурацию и делает многие методы, основанные на предположении о ее выпуклости и односвязности, неприменимыми. В этом случае решение задачи ОПС потребует дальнейшей процедуры уточнения формы и построения дискретного аналога ОР [9, 10].

Относительная близость точек $\mathbf{x}_c$ и $\mathbf{x}_c^K$ может предполагать наличие симметрии ОР относительно своего центра тяжести.

По точкам касания $K_i^+, K_i^-, i=\overline{1,n}$ строится многогранник (выпуклая оболочка данного множества точек, вписанный в B_0 политоп S) с совокупностью вершин $ver(S)=\{ K_i^+, K_i^-, i=\overline{1,n} \}$, аппроксимирующий область работоспособности. Необходимо отметить, что все точки касания $K_i^+, K_i^-, i=\overline{1,n}$ должны быть различны между собой. Найдя объем V_S этого многогранника [7], можно посчитать соотношение его объема и объема области работоспособности $\hat{V}_g$.

Если объем V_S политопа S меньше объема $\hat{V}_g$ области работоспособности $D_{\mathbf{x}}$, а также центроиды множества точек касания и центр тяжести области работоспособности принадлежат $D_{\mathbf{x}}$, можно построить приближение множества $D_{\mathbf{x}}$ вписанным многогранником S. На его основе задача ОПС сводится к задаче линейного программирования [11].

Заключение

К сожалению, на основании выполнения условий принадлежности центра тяжести области работоспособности и соотношения объемов ее приближения вписанным многогранником и области работоспособности вывод об односвязности и выпуклости области $D_{\mathbf{x}}$ сделать нельзя, так как они являются необходимыми, но не достаточными условиями. Окончательные выводы по этим критериям можно сделать лишь с помощью дорогостоящей в плане вычислений и хранения информации процедуры построения дискретного аналога области работоспособности [10].

Предложенная в работе процедура анализа проектного решения позволяет в дальнейшем выбрать наименее трудоемкую или наиболее точную из возможных стратегий параметрического синтеза [4]. Кроме того, проектировщик может выявить случаи, когда результаты структурного синтеза либо наложенные на входные параметры ограничения не позволят получить приемлемое решение.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта ДВО РАН 12-I-ОЭММПУ-01 в рамках Программы фундаментальных исследований ОЭММПУ РАН № 14 «Анализ и оптимизация функционирования систем многоуровневого, интеллектуального и децентрализованного управления в условиях неопределенности».

Список литературы

1. Абрамов, О. В. Параметрический синтез стохастических систем с учетом требований надежности / О. В. Абрамов. – М. : Наука, 1992.

2. ГОСТ Р 53480–2009. Надежность в технике. Термины и определения и определения. – М. : Стандартинформ, 2010.
3. Абрамов, О. В Функционально-параметрический подход в задачах обеспечения надежности технических систем / О. В Абрамов // Надежность и контроль качества. – 1999. – № 5. – С. 34–45.
4. Абрамов, О. В. Методы и алгоритмы параметрического синтеза стохастических систем / О. В. Абрамов // Проблемы управления. – 2006. – № 4. – С. 3–8.
5. Юрков, Н. К. К проблеме обеспечения глобальной безопасности / Н. К. Юрков // Надежность и качество : тр. междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – Т. 1. – С. 6–8.
6. Абрамов, О. В. Оптимальный параметрический синтез по критерию запаса работоспособности / О. В. Абрамов, Я. В. Катуева, Д. А. Назаров // Проблемы управления. – 2007. – № 6. – С. 64–69.
7. Катуева, Я. В. Геометрический анализ области работоспособности на основе метода Монте-Карло / Я. В. Катуева, М. Ф. Аноп // Информатика и системы управления. – 2011. – № 2 (28). – С. 30–40.
8. Васильев, Б. В. Надежность и эффективность радиоэлектронных устройств / Б. В. Васильев, Б. А. Козлов, Л. Г. Ткаченко. – М. : Советское радио, 1964.
9. Абрамов, О. В. Параллельные алгоритмы построения области работоспособности / О. В. Абрамов, Г. Б. Диго, Н. Б. Диго, Я. В. Катуева // Информатика и системы управления. – 2004. – № 2. – С. 121–133.
10. Катуева, Я. В. Алгоритмы анализа области работоспособности, заданной в матричной форме / Я. В. Катуева, Д. А. Назаров // Информатика и системы управления. – 2005. – № 2(10). – С. 118–128.
11. Катуева, Я. В. Сведение задачи оптимизации параметрической надежности к задаче линейного программирования / Я. В. Катуева // Информатика и системы управления. – 2012. – № 4 (34). – С. 75–80.

УДК 681.5.015.63:62-192

Катуева Я. В.

Стратегия параметрического синтеза проектного решения / Я. В. Катуева // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 2. – С. 94–99.

Катуева Ярослава Владимировна
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Институт автоматики
и процессов управления ДВО РАН
690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5.
8(423)2310452
e-mail: gloria@iacp.dvo.ru

Аннотация. Обсуждаются некоторые вопросы реализации функционально-параметрического подхода в задачах обеспечения надежности аналоговых технических устройств и систем. Рассматривается проблема синтеза систем с детерминированной структурой и случайными параметрами. Предлагается процедура анализа проектного решения для выработки дальнейшей стратегии параметрического синтеза.

Ключевые слова: параметрический синтез, параметр, надежность, оптимизация.

Y. Katueva
Ph.D., Senior Scientist,
Institute of Automation and management of FEB RAS
690041, Vladivostok, Radio st., 5.
8(423)2310452
E-mail: gloria@iacp.dvo.ru

Abstract. Some issues of functional-parametric approach implementation in analog units reliability problem are discussed. Deterministic structure and random parameters systems synthesis problem is considered. Design analysis procedure for further strategy developing is provided.

Key words: parametrical synthesis, parameter, reliability, optimization.

УДК 629.396.61

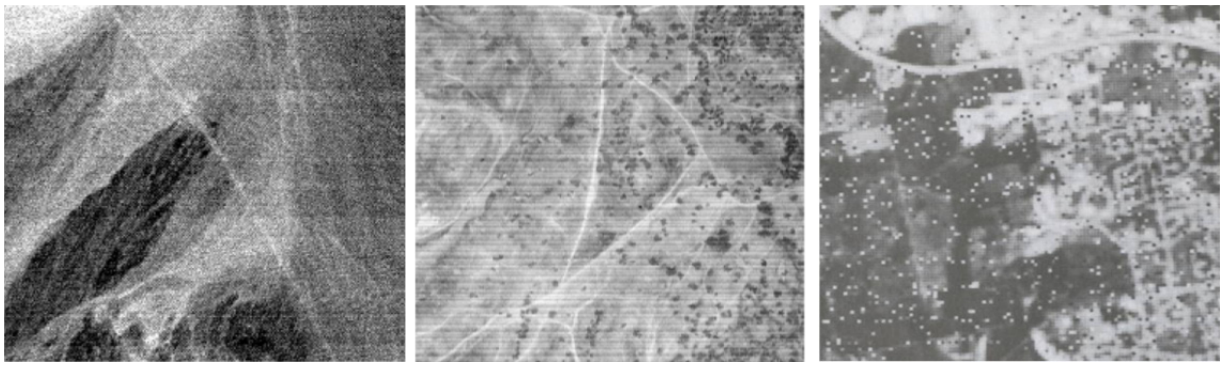
ФОРМИРОВАНИЕ ОЦЕНКИ МАКСИМАЛЬНОГО ПРАВДОПОДОБИЯ С УЧЕТОМ АНОМАЛЬНЫХ ОШИБОК

С. А. Забелин, Д. С. Ергалиев, А. Д. Тулегулов

Достоверность снимков, полученных посредством дистанционного зондирования Земли, зависит от многих факторов. К ним можно отнести как технические, так и программно-модельные условия. В технике наблюдения сигналов и оценки их параметров в настоящее время достигнуты серьезные успехи. Однако из-за наличия помех по принятому сигналу нельзя с полной достоверностью зафиксировать присутствие полезного сигнала и точно измерить его параметры.

Теория оценок изменяющихся параметров

Помехи обусловливают случайный характер результатов наблюдения, и поэтому изучение этих явлений осуществляется методами математической статистики. Дальнейшее усовершенствование большинства радиотехнических и радиофизических приборов и устройств имеет свой предел. Поэтому необходимо искать принципиально новые пути решения проблем приема сообщений, учитывающих статистические свойства различных характеристик передаваемых сообщений и шумов [1]. Как известно, возникновение шума обусловлено многочисленными факторами: тепловыми эффектами, сбоем детектора, взаимодействиями между электронными компонентами системы формирования изображения, ошибками дискретизации, ошибками передачи и др. Шумы на изображении появляются в самых разнообразных формах (рис. 1), и зачастую их сложно смоделировать, поэтому многие методы шумоподавления являются специальными, что, в принципе, удобно для разделения шумовых типов по категориям и обобщения описательных моделей шумов.



а) *б*) *в*)

Рис. 1. Различные типы шумов:
а – случайный пиксельный и полосовой шумы; *б* – полосовой шум; *в* – «солевой» и «перечный» шумы

Шумы в основном возникают в самих детекторах и в электронных компонентах системы формирования изображения. Их характеристики определяются в отдельных пикселах изображения или в пределах линий сканирования. Для получения хороших результатов необходимо устранить шум перед любой передискретизацией изображения для геометрической коррекции, так как передискретизация «смажет» шум в соседние пикселы и линии, что в дальнейшем только затруднит фильтрацию.

Характеристика шума в детекторе

Идеальный детектор должен действовать как преобразователь интенсивности излучения в ток или, что эквивалентно, как преобразователь падающих фотонов в электроны. Но в действи-

тельности в детекторе возникает множество шумов. Модель шумов в детекторе представлена на рис. 2.

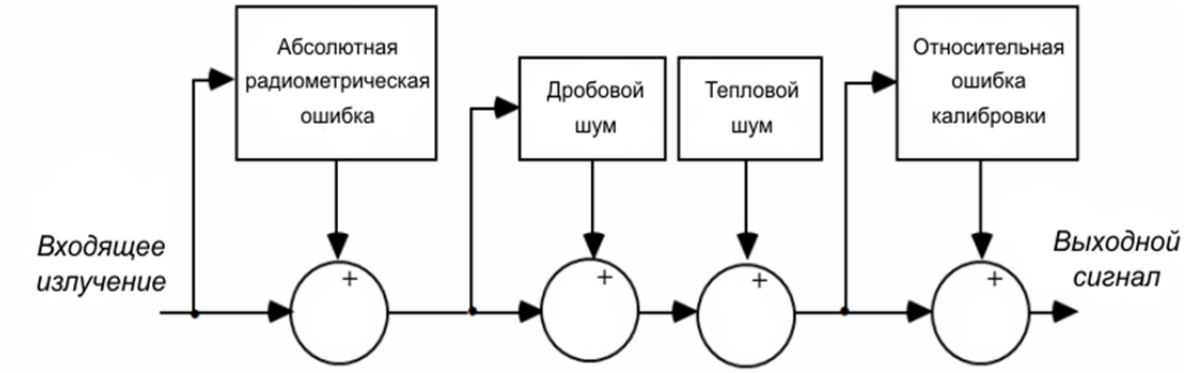


Рис. 2. Модель шумов в детекторе

Дробовой шум обусловлен беспорядочной флуктуацией напряжений и токов относительно их среднего значения в электронных компонентах детектора, ввиду дискретности электронов. Дробовой шум – основная составляющая внутренних шумов большинства радиоэлектронных устройств, которые приводят к искажению слабых полезных сигналов и ограничивают чувствительность усилителей.

Тепловой шум, вероятно, является наиболее общим видом шума, возникающим в электронных изображающих системах. Тепловой шум обусловлен тепловым движением электронов в проводниках, в результате этого на концах проводников возникает флуктуирующая разность потенциалов. В отличие от дробового шума тепловой шум зависит от температуры.

Также в системе детектора присутствуют два типа радиометрической ошибки – абсолютная и относительная ошибки калибровки. Абсолютная радиометрическая ошибка показывает отклонение между измеренным значением и действительным значением излучения, попадающего в детектор, и подразумевает детерминированное изменение в выходном сигнале. Относительная ошибка калибровки проявляется как стохастический шум. К появлению абсолютных ошибок могут привести изменения коэффициента пропускания оптики, изменения в характеристиках усилителей детектора, а к появлению относительных ошибок – изменения квантовой эффективности детектора. Таким образом, шумы в детекторе зависят от типа и расположения детектора.

Основные типы шумов и методы их подавления

Глобальный шум характеризуется случайным изменением *DN*-значений в каждом пикселе. Такой шум могут уменьшить низкочастотные пространственные фильтры, особенно если он является некоррелированым от пиксела к пикселу. Но в этом случае колебания чистого сигнала будут также уменьшены, хотя и в меньшем количестве, из-за свойственной пространственной корреляции, существующей в сигнале. Более сложные алгоритмы, которые подавляют шум, но сохраняют четкость изображения, известны как edge-preserving smoothing algorithms (сглаживающие фильтры, сохраняющие границы) [2].

Локальный шум проявляется в отдельных пикселах и линиях и, как правило, вызывается потерей передачи данных, резким перенасыщением детектора или другими проблемами в электронике. В зашумленных пикселах обычно имеются нулевые *DN*-значения, что указывает на потерю данных, или максимальные *DN*-значения, что указывает на перенасыщенность. Локальный пиксельный шум называют «солевым шумом» («salt noise»), если зашумленные пикселы имеют повышенное значение яркости, или «перечным шумом» («pepper noise»), если зашумленные пикселы затемнены. Усредняющий фильтр удаляет зашумленные линии на изображении, но в то же время изменяет многие другие пикселы. В условном усредняющем фильтре применяется алгоритм сравнения каждого пиксела исходного изображения с его непосредственными соседними пикселами выше и ниже. Если текущий пиксел отличается от среднего значения его двух сосед-

них пикселов (выше и ниже) больше указанного порога, его значение заменяется средним между этими тремя пикселами.

Глобальный периодический шум является ложной, повторяющейся структурой, которая имеет последовательные особенности по всему изображению. Одним из источников являются электронные взаимодействия в оборудовании приема или передачи данных; другим – различие в калибровке детекторов. Последовательная периодичность шума приводит к четким пикам при Фурье-преобразовании изображения. Если шумовые пики находятся на достаточном удалении от спектра изображения (шум – относительно высокой частоты), они могут быть удалены простым установлением их амплитуды в нуль. Отфильтрованный спектр тогда может быть подвергнут обратному Фурье-преобразованию для получения изображения без шума. Если частотные характеристики шума находятся в пределах спектра изображения, то действительная часть изображения будет также удалена, если установить амплитудные значения пиков шума в нуль. На практике эта проблема частично улучшается заменой пиков шума в области Фурье значениями, интерполированными по ближайшим соседним областям, свободным от шума. Локальный периодический шум отличается от общего периодического шума тем, что амплитуда, фаза или частота шума могут изменяться на всем изображении. Одним из подходов к решению этой проблемы является оценка локальной величины шума и удаление этой величины в каждом пикселе.

Различная чувствительность детекторов и другие электронные факторы могут стать причиной полосового шума на изображении (striping). Если полосовой шум вызван различием в калибровке детекторов, он имеет периодичность, соответствующую количеству детекторов, например, 16 для снимков TM или 10, 20, или 40 – для снимков MODIS. Исправление полосового шума лучше делать перед любой геометрической коррекцией, так как после нее массив данных не будет ортогональным к направлению сканирования, и удалить полосовой шум будет намного труднее. Были разработаны различные методы для исправления полосового шума [3–6].

Для описания случайных воздействий на сигнал в изображающих системах пользуются моделями аддитивного, импульсного и мультипликативного шума [7].

Модель аддитивного шума используется, когда сигнал на выходе системы или на каком-нибудь промежуточном этапе его преобразования может рассматриваться как сумма полезного сигнала и некоторого случайного сигнала (шума). Так, например, описывают действие зернистости фотопленки, флуктуационный шум в радиотехнических системах и т.п. Эффект добавления шума на изображении, представленном в *DN*-значениях, для *i*-го и *j*-го пикселов может быть записан в виде суммы истинного сигнала *S* и шума n_a [8]:

$$DN(i, j) = S(i, j) + n_a(i, j). \tag{1}$$

Если действие шума сказывается не по всей протяженности сигнала, а только в случайно расположенных точках, где значение сигнала заменяется случайной величиной, шум называют импульсным. Импульсный шум характерен для систем передачи изображений по радиоканалам с использованием нелинейных видов модуляции сигнала (частотной модуляции, время-импульсной и т. д.) и для цифровых систем передачи и хранения изображений. Мультипликативная модель применяется, когда можно считать, что полезный сигнал умножается на случайный сигнал. Таково, например, в первом приближении действие шума фотоэлектронных умножителей. Мультипликативный шум (спекл-шум) образуется в результате когерентной суперпозиции от пространственно случайных источников рассеяния. Рассеянные волны накладываются друг на друга, вызывая тем самым появление спекл-шума на изображении. Эффект добавления спекл-шума на изображении может быть представлен, как [8]:

$$DN(i, j) = S(i, j)n_m(i, j). \tag{2}$$

Этот тип шума зависит от величины отраженного сигнала.

Фильтрация изображений

Ослабление действия помех достигается фильтрацией. При фильтрации яркость (сигнал) каждой точки исходного изображения, искаженного помехой, заменяется некоторым другим значением яркости, которое признается в наименьшей степени искаженным помехой. Изображение

часто представляет собой двумерную функцию пространственных координат, которая изменяется по этим координатам медленнее (иногда значительно медленнее), чем помеха, также являющаяся двумерной функцией. Это позволяет при оценке полезного сигнала в каждой точке кадра принять во внимание некоторое множество соседних точек, воспользовавшись определенной похожестью сигнала в этих точках. В других случаях, наоборот, признаком полезного сигнала являются резкие перепады яркости. Однако, как правило, частота этих перепадов относительно невелика, так что на значительных промежутках между ними сигнал либо постоянен, либо изменяется медленно. И в этом случае свойства сигнала проявляются при наблюдении его не только в локальной точке, но и при анализе ее окрестности. Понятие окрестности является достаточно условным. Она может быть образована лишь ближайшими по кадру соседями, но могут быть окрестности, содержащие достаточно много и достаточно сильно удаленные точки кадра. В этом последнем случае, конечно, степень влияния далеких и близких точек на решения, принимаемые фильтром в данной точке кадра, будет совершенно различной. Таким образом, фильтрация основывается на рациональном использовании данных как из рабочей точки, так и из ее окрестности. Пространственные фильтры можно разделить на три категории [9]: фильтры низкой частоты – подчеркивают детали низкой частоты, чтобы сгладить шум и уменьшить ступенчатость изображения (сглаживающие, усредняющие фильтры); фильтры высокой частоты – подчеркивают детали высокой частоты, выделяют и подчеркивают линейные особенности – дороги, границы земля/вода, увеличивают детализацию без воздействия на элементы низкой частоты (фильтры резкости); фильтры подчеркивания границ – подчеркивают границы, окружающие объекты изображения, чтобы сделать их более различимыми. Результатом является изображение с серым тоном и черно-белыми линиями, окружающими границы объектов на изображении.

Сигма-фильтр. Основная проблема в сглаживании пространственного шума заключается в получении оптимального соотношения между усреднением шума и усреднением сигнала. При этом необходимо разделить эти две компоненты перед усреднением. В σ-фильтре они разделяются по контрасту [10]. Идея построения σ-фильтра основана на том, что закон распределения шума можно приближенно считать гауссовским. 95,5 % значений гауссовского распределения отклоняются от среднего значения меньше, чем 2σ. В соответствии с алгоритмом σ-фильтра оценивается среднее значение и среднеквадратическое отклонение яркостей в пределах достаточно большой маски; пикселы, имеющие яркость выше этого допуска, исключаются. Вместо исключенных пикселов подставляется среднее по окрестности. Отфильтрованное изображение составляют только те пикселы, которые имеют *DN*-значения в указанном пороге Δ относительно усредненных по окрестности *DN*-значений. Порог Δ может быть установлен в пределах стандартного отклонения σ *DN*-значений для глобального шума:

$$\Delta = k\sigma. \tag{3}$$

Если шум зависим от сигнала, порог Δ может быть адаптирован для локального стандартного отклонения:

$$\Delta_{\text{local}} = k\sigma_{\text{local}}. \tag{4}$$

Однако фильтр становится чувствительным к более высоким контрастным характеристикам сигнала, и они сглаживаются соответственно. σ-фильтр наиболее эффективен в борьбе с импульсными помехами в виде небольших точек.

Фильтр Нагао–Мацуямы

У σ-фильтра нет никакой направленной чувствительности. Многие пространственные характеристики области интереса линейны, по крайней мере, для локальных областей. Фильтр Нагао–Мацуямы был разработан для адаптации к линейным характеристикам при различных ориентациях [11]. В данном фильтре используется окно 5×5, и для каждого положения окна вычисляются *DN*-значения и изменения в каждом из девяти субокон (рис. 3). Значение субокна с самым низким изменением используется для выходного *DN*-значения. Таким образом, фильтр находит самую однородную локальную область (из девяти) и использует ее среднее значение для выходного сигнала.

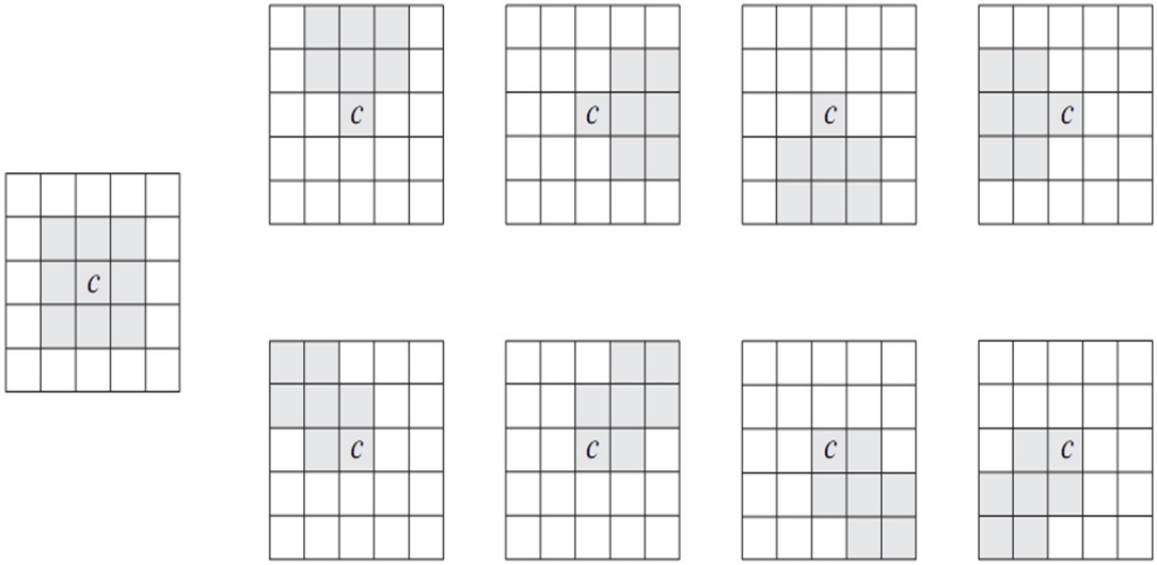


Рис. 3. Девять субокон используются для вычисления локальных изменений DN-значений по алгоритму Нагао–Мацуямы

Как было отмечено, источники шумов могут быть различными. И прежде чем применять тот или иной алгоритм шумоподавления, необходимо проанализировать изображение и структуру шума. В некоторых случаях для оценки шумовых параметров применяют данные о калибровке детектора и тестовые изображения. Однако таких данных не всегда достаточно или не всегда ясен источник шума (например, вмешательство от другого оборудования или влияние внешних источников сигнала). В таком случае необходимо извлечь всю возможную информацию о шуме из самого изображения. Фильтрация шумов не имеет единственного алгоритма, который можно было бы применить во всех случаях. При использовании большинства методов фильтрации требуются вычисление специфичных параметров изображения и «интерактивная настройка» этих параметров для достижения удовлетворительных результатов.

Список литературы

1. Куликов, Е. И. Оценка параметров сигналов на фоне помех / Е. И. Куликов, А. П. Трифонов. – М. : Сов. радио, 1978.
2. Abramson, S. B. Evaluation of edge–preserving smoothing filters for digital image mapping / S. B. Abramson, R. A. Schowengerdt // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 1993. – V. 48, issue 2. – P. 2–17.
3. Chin, R. T. Quantitative evaluation of some edge-preserving noise-smoothing techniques / R. T. Chin, C.-L. Yeh // Comp. Vision, Graphics and Image Proces. – 1983. – V. 23. – P. 67–91.
4. Algazi, V. R. Radiometric equalization of nonperiodic striping in satellite data / V. R. Algazi, G. E. Ford // Computer Graphics and Image Processing. – 1981. – V. 16, issue 3. – P. 287.
5. Poros, D. J. Methods for destriping Landsat Thematic Mapper images – A feasibility study for an online destriping process in the Thematic Mapper Image Processing System (TIPS) / D. J. Poros, C. J. Peterson // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 1985. – V. 51, № 9. – P. 1371–1378.
6. Horn, B. K. P. Destriping Landsat MSS images by histogram modification / B. K. P. Horn, R. J. Woodham // Computer Graphics and Image Processing. – 1979. – V. 10, № 1. – P. 69–83.
7. Pan, J.-J. Destriping of Landsat MSS images by filtering techniques / J.-J. Pan, C.-I. Chang // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 1992. – V. 58, № 10. – P. 1417.
8. Yaroslavsky, L. Introduction in digital image processing / L. Yaroslavsky. – M. : Sov. radio, 1979. – 312 p.
9. Corner, B. R. Noise estimation in remote sensing imagery using data masking / B. R. Corner, R. M. Narayanan, S. E. Reichenbach // International Journal of Remote Sensing. – 2003. – V. 24, № 4. – P. 689–702.
10. Tokareva, O. Data processing and interpretation for remote sensing of the Earth / O. Tokareva. – Tomsk : Publishing Tomsk polytechnic university, 2010. – 140 p.
11. Lee, J. Digital image smoothing and the sigma filter / J. Lee // Computer Vision, Graphics and Image Processing. – 1983. – V. 24, issue 2. – P. 255–269.

УДК 629.396.61
Забелин, С. А.
Формирование оценки максимального правдоподобия с учетом аномальных ошибок / С. А. Забелин, Д. С. Ергалиев, А. Д. Тулегулов // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 2. – С. 100–105.

Забелин Сергей Александрович
магистр,
кафедра космической техники и технологии,
Евразийский Национальный университет
им. Л. Н. Гумилева,
Казахстан, г. Астана, ул. Мунайтпасова, 5.
8(7172)547699
E-mail: Szabelin@mail.ru

Ергалиев Д. С.
кандидат технических наук, доцент,
кафедра космической техники и технологии,
Евразийский Национальный университет
им. Л. Н. Гумилева,
Казахстан, г. Астана, ул. Мунайтпасова, 5.
8(7172)547699
E-mail: eds_kaz67@mail.ru

Тулегулов А. Д.
кандидат физико-математических наук, доцент,
кафедра космической техники и технологии,
Евразийский Национальный университет
им. Л. Н. Гумилева,
Казахстан, г. Астана, ул. Мунайтпасова, 5.
8(7172)547699
E-mail: ATulegulov@mail.ru

S. Zabelin
master,
department space equipment and technology,
Eurasian National University
named L. N. Gumilev,
Kazakhstan, Astana, Munaitpassov st., 5.
8(7172)547699
E-mail: Szabelin@mail.ru

D. Ergaliev
candidate of technical sciences, associate professor,
department space equipment and technology,
Eurasian National University
named L. N. Gumilev,
Kazakhstan, Astana, Munaitpassov st., 5.
8(7172)547699
E-mail: eds_kaz67@mail.ru

A. Tulegulov
candidate of physico-mathematical sciences,
associate professor,
department space equipment and technology,
Eurasian National University
named L. N. Gumilev,
Kazakhstan, Astana, Munaitpassov st., 5.
8(7172)547699
E-mail: ATulegulov@mail.ru

Аннотация. Дается краткий обзор основных видов и моделей шумов, их характеристики. Рассматриваются методы повышения качества обработки спутниковых снимков, а также методы подавления и устранения шумов на изображениях, наиболее эффективные способы их фильтрации. Более подробно описываются такие типы фильтров, как сигма-фильтр, медианный фильтр, фильтр Нагао–Мацуямы. Приводятся примеры применения некоторых методов фильтрации спутниковых изображений.

Ключевые слова: модель, метод, зондирование, помеха, достоверность, шумы, сообщения, детектор, дискретизация, флуктуация, импульс, модуляция, спекл-шум, медианный фильтр.

Abstract. In article the short overview of principal types and models of noise, its characteristics is given. Methods of reduction and remove of noise, the most effective ways of image filtering are considered. Such types of filters, as the sigma-filter, median filter, Nagao-Matsuyama filter are in more details described. Examples of application of some filtering methods are considered.

Key words: model, method, probing, interference, reliability, noise, communication, detection, sampling, fluctuation, pulse modulation, speckle noise, median filter.

Вниманию авторов!

Редакция научно-практического журнала «Надежность и качество сложных систем» приглашает ученых и специалистов опубликовать оригинальные статьи, содержащие новые научные и практические результаты в области фундаментальных и прикладных исследований проблем обеспечения надежности и качества сложных как технических, так и эргономических систем по следующей тематике:

- фундаментальные основы обеспечения безопасности, надежности и качества;
- физико-математические методы и модели обеспечения надежности и качества сложных систем;
- информационная безопасность сложных систем;
- технологические основы повышения надежности и качества изделий;
- информационные технологии в проектировании, производстве, испытаниях и сертификации высоконадежных систем;
- надежность биологических и экологических систем и приборов;
- диагностические методы обеспечения надежности и качества сложных систем;
- моделирование и управление в эргономических системах;
- менеджмент качества предприятий и организаций.

Статьи, ранее опубликованные, а также принятые к опубликованию в других журналах, редколлегией не рассматриваются.

Редакция принимает к рассмотрению статьи, подготовленные с использованием текстового редактора Microsoft Word for Windows версий не выше 2003.

Необходимо представить статью в электронном виде (kipra@pnzgu.ru, дискета 3,5”, CD-диск) и дополнительно на бумажном носителе в двух экземплярах.

Оптимальный объем рукописи – 10–14 страниц формата А4. Основной шрифт статьи – Times New Roman, 14 pt, через полуторный интервал. Тип файла в электронном виде – RTF.

Статья **обязательно** должна сопровождаться индексом УДК, краткой аннотацией и ключевыми словами **на русском и английском языках.**

Рисунки и таблицы должны быть размещены в тексте статьи и представлены в виде отдельных файлов (растровые рисунки в формате TIFF, BMP с разрешением 300 dpi, векторные рисунки в формате Corel Draw с минимальной толщиной линии 0,75 pt). Рисунки должны сопровождаться подрисуночными подписями.

Формулы в тексте статьи выполняются в редакторе формул Microsoft Word Equation, версии 3.0 и ниже. Символы греческого и русского алфавита должны быть набраны прямо, нежирно; латинского – курсивом, нежирно; обозначения векторов и матриц – прямо, жирно; цифры – прямо, нежирно. Наименования химических элементов набираются прямо, нежирно. Эти же требования **необходимо** соблюдать и в рисунках. Допускается вставка в текст специальных символов (с использованием шрифтов Symbol).

Редколлегия