

## ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИНЦИПА ИНВАРИАНТНОСТИ ПРИ АНАЛИЗЕ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ ЧЕЛОВЕК–МАШИНА НЕКЛАССИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Рассматривается актуальный вопрос применения принципа инвариантности при анализе процессов в системах человек–машина неклассическими методами. Показана возможность определения противодействия пилота негативным факторным накладкам по параметрам полета современных самолетов. Это обусловлено качественным сохранением структуры движения пилота при взаимодействии с системой управления.

### Введение

Топологические инварианты могут рассматривать структуры преобразований более широко. Например, преобразование квадрата в круг можно назвать топологическим инвариантом. В нашем примере — преобразование внутренних и внешних процессов человека-оператора (ЧО, в данном случае — пилота) в полетные данные бортовых самописцев воздушного судна (ВС). Очень важен вопрос: «Инвариантны подобные преобразования или неинвариантны?» (рис. 1), поскольку практическая задача — освобождение ЧО от системы датчиков определения психофизиологических параметров.

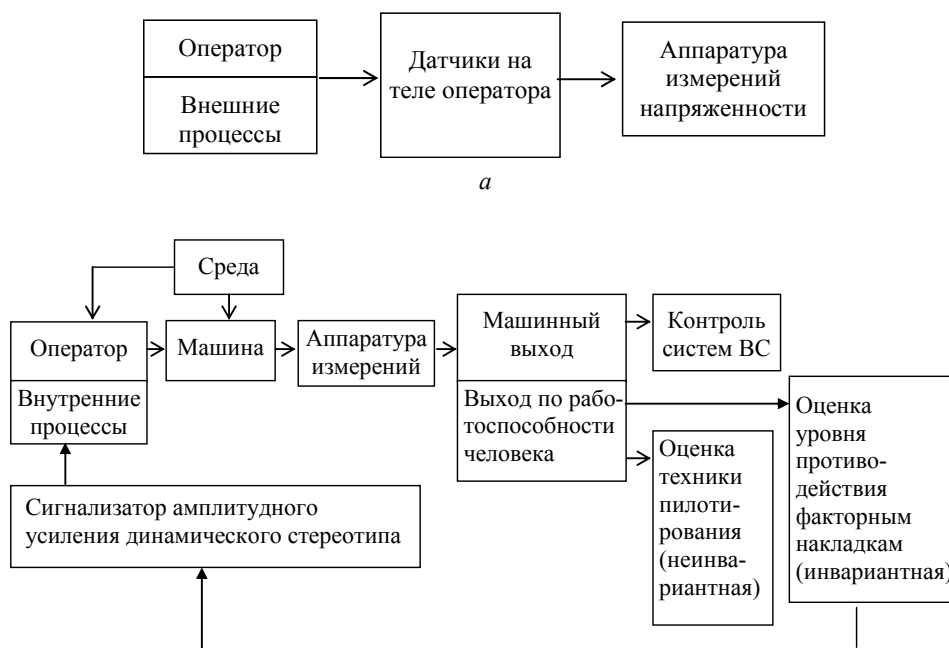


Рис. 1. Схемы сравнения методов определения характеристик пилота по датчикам и машинному выходу: *a* — классические методы — преобразование характеристик ЧО в выходы аппаратуры; *b* — неклассические методы — преобразование характеристик ЧО в машинные выходы ВС

И это центральный вопрос неклассических методов измерения процессов человека: на рис. 1 представлено два подхода к определению характеристик ЧО. Первый — классический, предполагает размещение датчиков психофизических параметров (пульс, дыхание, давление, сердечный ритм и т.д.) на поверхности тела в контактной и неконтактной формах. На практике этот способ анализа характеристик ЧО широко используется и доведен до совершенства в комплексных полиэффекторных подходах с техническими средствами на основе электронной и компьютерной обработки данных, в том числе в простом или телеметрическом виде. Такой подход не вызывает научных дискуссий, но на практике его применение ограничено динамической операционной деятельностью ЧО или возникающей проблемой доступности (например, ограниченности размеров кабины пилота современных ВС).

Второй подход — измерение характеристик ЧО и оценка его эффективности работы по машинным выходам, например по параметрам полета — крену, курсу, углу атаки и т.д., научно менее обоснован. Поэтому и возникает необходимость еще раз с позиции общей теории инвариантности рассмотреть границы и область применения такого подхода как более перспективного, чем первый.

**Постановка задачи:** измерение характеристики процессов человека по машинному выходу.

Такая постановка возможна тогда и только тогда, когда машина производит инвариантное преобразование характеристик двигательных процессов человека. Особенно это важно в задачах слежения (работа штурвалами, рычагами управления, кнопками, клавишами и т.д.).

Рассмотрим некоторые важные послышки развития неклассического подхода.

## 1. Общая теория инвариантности

Впервые понятие инварианта возникло в линейной алгебре. Исследователь круговых, кольцевых, матричных и других преобразований всегда встречался с процедурой, полностью вариативной (изменяющейся), и процедурой, которая сохраняла математические свойства, знаки, символы, формулы. Простейшим инвариантом были так называемые постоянные коэффициенты, которые имели буквенное, а не чисто цифровое значение.

Сохранение постоянных коэффициентов в процессе математических преобразований (например, в матричных уравнениях) и привело к обобщенному понятию инварианта. В самом широком смысле под инвариантом понимается сохраняемая, неизменная часть (величина, цифра, число, формула, алгоритм и т.д.) любого математического преобразования.

Математические преобразования — это, как правило, односторонний процесс. Поэтому инварианты в простейшем виде возникают по цепочке:

- начало преобразования → конец преобразования;
- число → то же число;
- символ → тот же символ;
- круг → тот же круг и т.д.

Так было на начальной стадии развития теории инвариантности до появления математической топологии.

## 2. Инвариантность в теории случайных процессов (ТСП), стационарность и эргодичность как виды инвариантности

Основные понятия в ТСП — это вероятность и законы ее распределения. Однако на практике такой способ определения характеристик случайных процессов очень ограничен и имеет четко выраженные границы применения. Например, для построения простейших законов распределения нужно не меньше 500–600 измерений в однородном вероятностном пространстве. Это вызвано тем, что инвариантом любого распределения является определенное число интервалов квантования в законе. На практике оно, как правило, для всех видов законов одинаково (для дискретных и непрерывных) и равно 6–8 (10–12).

Это очень хорошо видно на основном законе распределения непрерывных случайных величин и процессов — нормальном законе распределения (законе Гаусса), который строится на основе «колоколообразной» экспоненциальной функции  $l^{x^2}$ . Но тогда достоверность измерения каждого интервала закона требует: число интервалов квантования  $\times 10 = 6 \times 100 = 600$ ;  $8 \times 100 = 800$  и т.д. (рис. 2).

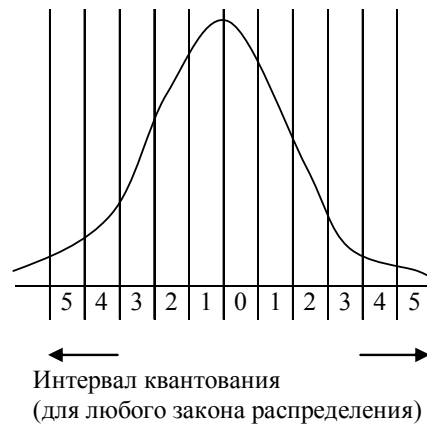


Рис. 2. Пример квантования при нормальном законе распределения

Безусловно, 300, 400, 500–800 измерений одного процесса (для величины — значений, для процесса — реализаций) — очень серьезное ограничение, так как на практике такие методы можно применить только к явлениям, которые в статистике называются массовыми. Массовые явления в производственных процессах — это обычно простейшие производственные операции, например, изготовление модульных деталей, узлов, конструкций, элементов микроплат и т.д.

Однако для практических сложных процессов, которые охватывают управление, контроль, ремонт и поиск неисправностей, техническое обслуживание машин в целом (когда в конструкторской спецификации до сотен тысяч элементов), условие построения вероятностного закона, а значит,

и статистической достоверности, трудно достижимо. На рис. 3 приведен пример случайного процесса с дискретной компонентой  $t_i$  (полет ВС, где  $t_B$  — взлет, а  $t_{\Pi}$  — посадка), поэтому возникают методы моделирования (например, методы Монте-Карло и др.), но они не решают эту проблему.

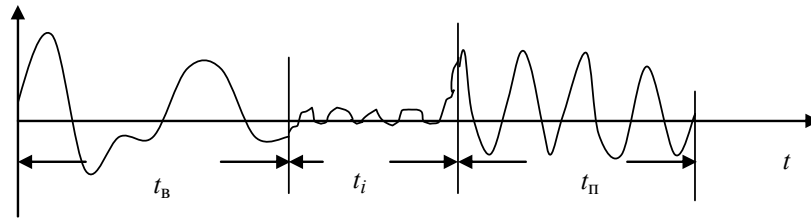


Рис. 3. Пример случайного процесса с дискретной компонентой  $t_i$  в производственных процессах

Из рис. 3 видно, что процессы управления, как правило, во времени неоднородны, состоят из разных по качеству участков (этапов)  $t_B$ ,  $t_i$ ,  $t_{\Pi}$ , которые в целом не описываются в рамках классической теории нестационарных, чистых стационарных процессов [1].

Проблема инвариантности в теории случайных процессов решается через понятия стационарность и эргодичность, но этого также недостаточно.

Инвариантами при этом являются:

при стационарности — вероятностный процесс, в котором ее характеристика, например математическое ожидание, не изменяется во времени;

при эргодичности — характеристики по совокупности равны временным характеристикам.

Рассмотрим основные понятия в общей теории инвариантности по данным современной математики (они достаточно широки, но, к сожалению, содержат элементы неопределенности):

- инвариант;
- интегральный инвариант динамической системы (по Биркгофу);
- ковариантность;
- корреляция;
- теория инвариантов в линейной алгебре;
- линейный и нелинейный оператор;
- преобразование;
- полигармоническая функция;
- случайный процесс;
- квазипериодические функции;
- класс специальных функций;
- соизмеримые и несоизмеримые периоды: типа  $\cos x + \cos \sqrt{2}x$ ;
- формула Эйлера:  $\cos x = \frac{e^{ix} + e^{-ix}}{2}$ ;  $\sin x = \frac{e^{ix} - e^{-ix}}{2i}$ ;

связь с экспонентами:  $e^{ix} = \cos x + i \sin x$ ;

— преобразование через произведения:  $\sin x = x \prod_{n=1}^{\infty} \left( 1 - \frac{x^2}{\pi^2 n^2} \right)$  (бесконечные произведения).

Согласно [2] в теории инвариантности в системах автоматического распознавания рассматриваются общие вопросы теории инвариантности и ее применения, которые включают в себя следующие системы:

- комбинированные;
- многосвязные;
- импульсные и цифровые;
- самонастраиваемые и пр.

Основные математические теории, на которых должна строиться общая теория инвариантности, рассматривающая связь процессов человека и процессов машины:

- общая теория инвариантности и ее локальные (местные) основания;
- общая теория колебаний, дефиниции и классификации колебаний;
- теория инвариантов в линейной алгебре;
- теория интегральных и дифференциальных инвариантов в общей теории динамических систем;
- общая теория действий и противодействий человека (теория И. Сеченова);
- общая теория функционального математического анализа и теория множеств;
- общая теория постоянных величин (абстрактная и современная арифметика).

Интересным представляется переход от принципа максимального правдоподобия к принципу инвариантности от внешних способов внешнего выделения сигнала к внутренним (рис. 4). Это дает возможность рассмотреть основные функции радиолокационных станций, где участвует ЧО:

- измерение угловых координат;
- измерение дальности, как инвариантные.



Рис. 4. Схема перехода от внешних способов внешнего выделения сигнала к внутренним

На основе анализа этих теорий можно разработать дефиниции и классификации по инвариантности всех явлений (например [3–5]), в том числе явления усиления динамического стереотипа [6].

Следует отметить, что в системе «глаз–рука» у ЧО в процессе слежения наблюдается колебательность «выходного» канала [7]. На выходе машины также наблюдаются колебательные движения, а не ступенчатые. Таким образом, напрашивается вывод об инвариантности человеческого и машинного выходов при оценке степени усиления динамического стереотипа пилота [6].

### **Заключение**

Психофизиологические датчики о характеристиках человека-оператора несут в основном информацию по выходным сигналам, которая математически описывается общей теорией колебаний.

Колебательный характер выходных характеристик ЧО позволяет сделать вывод для систем слежения о том, что машинные выходы систем инвариантны по отношению к входным характеристикам системы, если на входе такой системы работает ЧО.

Из общей теории автоматики и автоматических систем управления известно, что по отношению ко всем видам колебаний (синусоидальные, модулированные, со случайным спектром и т.д.) существующие системы инвариантны по схеме «вход–процесс–выход».

В практическом плане инвариантность системы «человек–машина» позволяет по машинным выходам определить инвариантные свойства и характеристики ЧО без размещения контактных и бесконтактных психофизиологических датчиков.

1. *Анисимов В.В.* Случайные процессы с дискретной компонентой. Предельные теоремы. — Киев: Вища шк., 1988. — 184 с.
2. *Теория инвариантности в системах автоматического управления* // Тр. второго Всесоюз. сов., Киев, 1962. — М.: Наука, 1964. — 512 с.
3. *Петров Б.Н., Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С.* Принцип инвариантности в измерительной технике. — М.: Наука, 1976. — 242 с.
4. *Карташов Г.Д.* Исследование проблемы инвариантности в теории надежности. Спец. 01.01.09. — Мат. кибернетика: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — М., 1975. — 32 с.
5. *Хенман Э.* Представления групп и прикладная теория вероятностей. — М.: Мир, 1970. — 117 с.
6. *Грищенко Ю.В.* Явление усиления динамического стереотипа пилота при действии комплексных отказов // Эргономические вопросы безопасности полетов. — К.: КИИГА, 1987. — С. 87–91.
7. *Суходольский Г.В.* О колебаниях системы «глаз–рука» человека при слежении // Теоретическая и прикладная психология в Ленинградском университете: Тез. докл. — Л.: Ленинград. отд. общества психологов СССР и факультет психологии Ленинград. ун-та, 1969. — С. 187–189.