DOI 10.37882/2223-2966.2024.01.15

# МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕКУЩЕГО И ПРОГНОЗИРУЕМОГО СОСТОЯНИЯ ЭРГАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

**METHODOLOGY FOR STUDYING THE CURRENT AND PREDICTED STATE OF THE ERGATIC SYSTEM**

***V. Zababurin***

*Summary*. The relevance of the problem of managing the state of the ergatic system is formulated. A hypothetical control subsystem is identified that ensures the safe state of the system under study. The essential variables of the ergatic system under study are determined: its target function, organizational structure, parameters of disturbing flows and the law of distribution of their intensity. The initial conditions for quantitative determination of the intensity of disturbances in the system are formulated. A formalized mathematical apparatus for analyzing and predicting the states of the ergatic system has been developed by determining its discrete states. Predictive filters were constructed for each time series of limiting probabilities of states of the system under study. The main advantages of the polynomial description of the line of behavior of the system under study are formulated. Ways have been proposed for the practical implementation of the methodology for studying the current and predicted states of the ergatic system under the conditions of the functioning of hazardous production facilities.

*Keywords*: ergatic system, research methodology, system analysis, system state, objective function, marginal probability, dangerous state, time interval, polynomial, system of equations.

***Забабурин Владимир Михайлович***
*Доцент, кандидат технических наук, доцент, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, г. Новочеркасск*
*zababurin64@mail.ru*

*Аннотация*. Сформулирована актуальность проблемы управления состоянием эргатической системы. Выделена гипотетическая управляющая подсистема, обеспечивающая безопасное состояние исследуемой системы. Определены существенные переменные исследуемой эргатической системы: ее целевая функция, организационная структура, параметры возмущающих потоков и закон распределения их интенсивности. Сформулированы исходные условия для количественного определения интенсивности возмущений в системе. Разработан формализованный математический аппарат анализа и прогнозирования состояний эргатической системы с помощью определения ее дискретных состояний. Построены прогнозирующие фильтры для каждого временного ряда предельных вероятностей состояний исследуемой системы. Сформулированы основные достоинства полиномиального описания линии поведения исследуемой системы. Предложены пути практической реализации методики исследования текущих и прогнозируемых состояний эргатической системы в условиях функционирования опасных производственных объектов.

*Ключевые слова*: эргатическая система, методика исследования, системный анализ, состояние системы, целевая функция, предельная вероятность, опасное состояние, интервал времени, полином, система уравнений.

## Введение

Эргатические системы нашли широкое применение в современной науке и практике. Вследствие «открытости» и наличия «человеческого фактора» в таких системах уровень стохастичности динамики их текущих состояний достаточно высок. Это, в свою очередь, ведет к росту вероятности появления опасных состояний системы и снижению ее устойчивости. В связи с этим проблема управления состоянием эргатической системы является актуальной и требует оперативных действий. На наш взгляд, решить эту проблему можно с позиции системности путем последовательного определения дискретных состояний системы с последующим построением прогнозирующих фильтров для каждого временного ряда предельных вероятностей состояний исследуемой системы.

## Определение исследуемой системы

Для решения сформулированной выше проблемы в работе предусмотрен системный подход. Как известно, в общем виде системный анализ состоит из следующих этапов:

— постановка задачи;
— структуризация системы;
— построение и исследование модели [1].

С учетом этого представим цепь рассуждений, начиная с определения исследуемой системы. Под системой будем понимать множество объектов, которые обладают заранее определенными свойствами с фиксированными между ними отношениями [2]. В соответствии с рекомендациями [3]: «Вещи *m* образуют систему относительно заданного отношения *R* и свойства *P*, если в этих вещах существуют свойства *P*, находящиеся в отношении *R*». В символах алгебры логики это утверждение выглядит следующим образом:

$$(m)S_\eta = Def\left[R\left(P_\eta\right) \vec{\&} \left(m\right)P_\eta\right]$$

Приведенное утверждение позволяет выделить в эргатической системе гипотетическую подсистему, отличительной чертой которой является наличие в ней таких свойств $P$ и отношений $R$, которые удерживают систему от перехода из области безопасных $(m)S_\eta$ в область опасных $(m)S_x$ состояний под воздействием внешних возмущений среды. Далее такую подсистему будем называть «управляющей», поскольку, функционируя в рамках эргатической системы, она контролирует некоторую группу ее параметров, стремясь удержать их в зоне безопасных состояний. Определить управляющую подсистему можно как совокупность средств и способов обеспечения безопасного состояния эргатической системы в процессе ее функционирования.

## Определение существенных переменных

С целью идентификации целевой функции управляющей подсистемы прежде всего следует определить ее существенные переменные, т.е. аргументы таких событий, функции которых характеризуют текущее состояние системы. Множество аргументов должно представлять группу независимых событий. Совокупность $n$ функций таких аргументов в $n$-мерном пространстве с вероятностью $P_i$ определит линию поведения системы [4]. Функции могут иметь непрерывный характер или иметь ряд дискретных значений. Линия поведения системы во времени определится последовательностью состояний и временными интервалами между ними. Состояния системы могут быть представлены в фазовом пространстве в виде репрезентативной точки, координаты которой соответственно равны значениям переменных.

В качестве существенных переменных целесообразно принять совокупность причин и условий, формирующих потоки возмущений, которые в свою очередь, ведут к переходу системы из состояния $(m)S_\eta$ в состояние $(m)S_x$. С учетом этого условия целевая функция управляющей подсистемы заключается в определении качественных и количественных характеристик параметров эргатической системы, влияющих на уровень ее устойчивости, и разработке комплекса действий, удерживающих значения этих параметров в зоне оптимальной функциональности.

В ранее опубликованной работе [5] было дано обоснование целевой функции и организационной структуры управляющей подсистемы с позиции причинной обусловленности событий.

## Определение параметров возмущающих потоков

Для построения адекватной математической модели важным моментом является выбор метода исследования количественной характеристики динамики возмущающих воздействий. Статистической характеристикой результатов воздействия на исследуемую систему возмущающих факторов являются такие состояния некоторой $m_j$ группы элементов системы, при которых они приобретают опасные свойства $P_x$. Случаи перехода системы из безопасного состояния

$$(m)S_\eta = Def\left[R(P_\eta)\vec{\&}(m)P_\eta\right]$$

в опасное

$$(m)S_X = Def\left[R(P_{\eta,X})\ \vec{\&}\ (m_i)P_\eta\ \&\ (m_j)P_X\right],$$

где $P_\eta$ — свойство системы иметь безопасные характеристики; $P_x$ — свойство системы иметь опасные характеристики, могут быть зафиксированы в виде условных отказов.

Для количественного определения интенсивности возмущений, действующих в исследуемой системе, формулируются следующие исходные условия:

— Принимается условная приведенная единица времени $\bar{t}$;
— Случаи опасного состояния системы $(m)S_x$ равномерно распределены между всеми условными единицами времени;
— Продолжительность опасного состояния системы ограничена длиной единичного интервала времени $\bar{t}_i$;
— Потоки событий, переводящие систему из безопасного $(m)S_\eta$ в опасное $(m)S_x$ состояние, согласованные с условным временем, будем называть потоками возмущений.

Принятые условия дают возможность представить линию поведения управляющей подсистемы в виде непрерывного ряда временных интервалов, каждый из которых характеризуется дискретными состояниями.

Если принятую длину интервала времени τ выразить через единичный интервал времени $\bar{t}_i$ как

$$\tau = m \cdot \bar{t}_i,$$

где $m$ — количество приведенных единиц времени на длине интервала, то интенсивность потоков возмущений можно определить как отношение опасных состояний системы $n$ за период τ к числу условных единиц времени m, содержащихся в этом периоде

$$X = \frac{n}{m}$$

Исследованиями установлено, что в анализируемой системе вероятность одновременного появления двух и более событий равна нулю, а также отсутствует функциональная связь между частотами появления различных причин смены состояний системы. В связи с этим можно утверждать, что потоки событий, приводящих к появлению опасных состояний эргатической системы, обладают свойствами стационарности, ординарности и характеризуются отсутствием последействия [6]. Это дает основание отнести их к категории простейших пуассоновских потоков. В соответствии с законом Пуассона [7]: вероятность попадания на некоторый участок времени τ, взятый на временной оси, равна $m$ событий и выражается формулой

$$P_m = \frac{\lambda^m}{m!} e^{-\lambda},$$

где λ — среднее число событий, происходящих на участке τ.

## Определение состояний системы в предыстории

Процесс последовательной смены текущих состояний исследуемой системы представляет собой марковский случайный процесс с дискретными состояниями и непрерывным временем.

Следуя рекомендациям [8], определение дискретных состояний марковской цепи может быть сведен к следующему. Поскольку события, состоящие в том, что в момент времени $t$ элементы системы находятся в состояниях $S_1$, $S_2$, …, $S_n$, несовместны и образуют полную группу, очевидно, что для любого $t$ сумма вероятностей состояний равна единице:

$$\sum_{i=1}^{n} P_i(t) = 1$$

С целью определения вероятности состояний $P_1(t)$, $P_2(t)$, …, $P_n(t)$ для любого $t$ необходимо дать количественную характеристику процессу, под воздействием которого система переходит из одного состояния в другое. Используем для этого значение плотностей вероятности перехода $\lambda_{ij}$, определяемое как предел отношения вероятности перехода системы из состояния $S_i$ в состояние $S_j$ к длине промежутка времени Δ$t$:

$$\lambda_{ij} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{P_{ij}(\Delta t)}{\Delta t}$$

где $P_{ij}(\Delta t)$ — вероятность того, что система, находившаяся в момент $t$ в состоянии $Si$, за время Δ$t$ перейдет в состояние $S_j$.

При малом Δ$t$ с точностью до бесконечно малых порядков

$$P_{ij}(\Delta t) \approx \lambda_{ij} \Delta t$$

Таким образом, характеристикой состояний исследуемой системы будут значения вероятностей появления каждого состояния системы $P_i(t)$ в данный момент времени $t$.

Для оценки и формализованного описания состояния системы воспользуемся системой дифференциальных уравнений Колмогорова в матричной форме:

$$\frac{dP}{dt} = AP$$

где $P = (P_0, P_1, P_2, \ldots, P_n)$ — вектор вероятностей состояний системы; $A$ — матрица плотностей вероятностей переходов [9].

В результате интегрирования такой системы уравнений получим искомые вероятности ее состояния как функции времени. Начальные условия выбираются в зависимости от того, в каком начальном состоянии была система $S$. Если в начальный момент (при $t$ = 0) система находилась в состоянии $S_1$, то начальные условия будут: $P = 1$; $P_2 = P_3 = \ldots = P_n = 0$.

Поскольку все интенсивности возмущающих потоков, в соответствии с принятыми условиями постоянны, очевидно, при $t = \infty$ в исследуемой системе устанавливается некоторый предельный стационарный режим, который описывается предельными вероятностями состояний, не зависящими от времени.

Для вычисления всех предельных вероятностей системы ($P_1$, $P_2$, …, $P_n$) достаточно преобразовать систему дифференциальных уравнений Колмогорова, положив все левые части (производные) равными нулю, в систему линейных алгебраических и решить ее с учетом так называемого «нормировочного условия» — $\sum P_i = 1$.

В нашем случае появление опасного состояния является одним из выходов системы. Всех выходов может быть:

$$E \subset \{E_0 + E_1 + \ldots + E_n\},$$

где $E_0$ — совокупность множества объективно безопасных выходов системы; $E_1$, $E_2$, …, $E_n$ — множества выходов системы, представляющих опасные состояния, которые могут появиться под действием 1, 2, …, $n$ причин.

С учетом этого предельные вероятности появления опасных состояний по отдельным причинам могут служить критерием количественной и качественной характеристик функционирования управляющей подсистемы. При этом «автоматически» будут учитываться все возможные связи между элементами ее структуры и внешней средой.

## Определение прогнозируемого состояния системы

Линия поведения исследуемой системы во времени не стабильна из-за стохастического характера возмущений. В связи с этим решение непрерывной цепи Маркова целесообразно свести к анализу динамики эмпирических значений параметров системы и построению прогнозирующего фильтра, учитывающего результаты такого анализа.

Полученные в результате решения уравнений дискретные значения $У_i = P_i$ на временной оси могут быть представлены в виде эмпирических кривых. Значения случайной величины могут быть определены через равные отрезки времени $t$. Задача определения функциональной зависимости $У = f(t)$ в частном случае может быть сведена к нахождению непрерывной функции путем выравнивания статистической кривой методом наименьших квадратов с использованием ортогональных полиномов Чебышева:

$$f(t) = k_0\varphi_0(t) + k_1\varphi_1(t) + ... + k_\lambda\varphi_\lambda(t),$$

где $k_0, k_1, \ldots k_\lambda$ — коэффициенты ряда Чебышева; $\varphi_0(t), \varphi_1(t), \ldots \varphi_\lambda(t)$ — ортогональные полиномы Чебышева.

Полученная таким путем парабола степени λ представляет собой непрерывную функцию, с достаточной степенью достоверности отображающую динамику параметра ($У = P$) на всем периоде предыстории исследуемой системы. Такую функцию можно экстраполировать для получения значений переменных в будущем с использованием полиномов вида

$$У_{n+1}^k = A(aУ_1 + bУ_2 + ... + mУ_n),$$

где $У_1, У_2, \ldots, У_n$ — дискретные значения переменной величины; $n$ — количество точек сглаживания кривой.

Поскольку потоки событий, переводящих систему из состояния в состояние, независимы друг от друга, возможно построение прогнозирующих функций раздельно для каждого временного ряда предельных вероятностей отдельных состояний системы.

Полиномиальное описание линии поведения исследуемой системы позволяет, на наш взгляд, более объективно оценить динамику воздействия на неё основных влияющих факторов и сделать краткосрочный прогноз для принятия оптимальных управляющих решений.

## Выводы

Таким образом, использование современных методов исследования сложно-динамических систем позволяет разработать формализованный математический аппарат анализа и прогнозирования их текущих состояний. Разработанная методика исследования текущего и прогнозируемого состояния эргатической системы может быть представлена в виде последовательности логических и математических операций и соответствующих способов их выполнения, представленных в табл.1.

Таблица 1.

Методика исследования, текущего и прогнозируемого состояния эргатической системы

| № п/п | Последовательность операций | Методы исследования. Способы выполнения |
|---|---|---|
| 1 | Задание системы | Эвристический. Системный подход. Монографический анализ |
| 2 | Определение существенных переменных | Эвристический. Статистический анализ. Теория исследования операций |
| 3 | Определение параметров возмущающих потоков | Методы математической статистики и теории вероятностей |
| 4 | Определение состояний системы в предыстории | Решение системы алгебраических уравнений |
| 5 | Расчет прогнозируемого состояния системы | Вычисление многочленов Чебышева, расчет прогнозирующих функций |
| 6 | Инженерная оценка результатов | Эвристический, системный, математическое программирование и проч. в зависимости от постановки задачи |

*Источник*: Составлено автором на основании [4]

Необходимыми условиями практического применения предлагаемой методики является детерминированное определение самой системы, а также выделение необходимого количества ее существенных переменных и критериев их оценки. В зависимости от постановки задачи (при соблюдении вышеуказанных условий) модель функционирования системы может быть применена для анализа причин проявления внешних возмущений, оценки динамики состояний исследуемой системы и ее оперативного управления, а также решения других задач.

На заключительном этапе реализации разработанной методики исследования текущего и прогнозируемого состояния эргатической системы выполняется оценка полученных результатов. Для этого, используя методы математического программирования с учетом постановки задачи, сравниваются полученные в результате расчетов предельные состояния системы в предыстории и принятые по данным прогноза, а также формулируются выводы об эффективности функционирования системы и необходимости принятия того или иного управляющего решения.

Следует отметить, что предложенные модель и методика оценки текущего и прогнозируемого состояния системы обладают высоким уровнем абстракции и могут быть применимы на различных уровнях иерархии исследуемой системы.

На практике предложенный методический подход исследования может быть успешно применен, например, в системах обеспечения и управления безопасностью труда на опасных производственных объектах т.к. создает объективные предпосылки для обоснованного принятия оптимальных управляющих решений, способствующих переходу системы в новое более качественное безопасное состояние.

ЛИТЕРАТУРА

1. Оразбаев Б.Б., Курмангазиева Л.Т., Коданова Ш.К. Теория и методы системного анализа: учебное пособие. — М.: Издательский дом Академии Естествознания. — 2017. — 248 с.
2. Котлярова И.О. Инновационные образовательные системы // Вестник ЮУрГУ. — 2008. — № 8. — С. 12–23.
3. Калужский М.С. Общая теория систем. Учеб. пособие. М.: Директ медиа. — 2013. — 177 с.
4. Забабурин В.М. Информационно-аналитическая система управления безопасностью труда на шахте // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. — 2014. — № 3. — С. 94–98.
5. Забабурин В.М., Задоенко М.А. Система и модель оценки текущего состояния безопасности на угольной шахте// Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — №4. — С. 327–331.
6. Бондаренко П.С., Горелова Г.В., Кацко И.А. Теория вероятностей и математическая статистика. Учеб. пособие под ред. И.А. Кацко, А.И. Трубилина/Москва: КНОРУС. — 2019. — 390 с.
7. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология/ Учеб. пособие. 6-е изд., М.: Юстиция. — 2018. — 192 с.
8. Кочетков П.А. Краткий курс высшей математики: Учеб. пособие. М.: МГИУ. — 2000. — 98 с.
9. Бахвалов М.А. Моделирование систем. Учеб. пособие. М.: Высшее горное образование. — 2006. — 295 с.
10. Исаев А.Б., Ковальчуков Н.Н., Савельев И.А. Анализ и синтез систем многомерных ортогональных полиномов Чебышева в задачах регрессионного анализа // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2013. — №8. — С. 262–269.