

ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ РЕГИОНАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКИ В ПРОБЛЕМЕ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

А. А. Баламутова, Н. С. Попов, А. В. Андреев

*Кафедра «Природопользование и защита окружающей среды»,
eco@mail.tstu.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: возмущения; диагностика неполадок; иерархическое управление; потери на обслуживание; устойчивое развитие; экономическая система.

Аннотация: Региональные экономические системы (РЭС) относятся к системам длительной эксплуатации, подверженным широкому кругу внутренних и внешних вызовов (возмущений). Дестабилизирующее их действие удается предотвратить с помощью типовой системы менеджмента. Однако в задачах управления устойчивым развитием РЭС неизбежно возникает необходимость в эволюции системы по причине перехода ее в предельные (климаксные) состояния, диагностика которых в системах менеджмента ранее не осознавалась как необходимая функция. В этой связи рассмотрены возможные способы обнаружения и диагностики таких состояний.

Введение

Региональные экономические системы (РЭС) как объекты управления представляют собой целостные территориальные образования, состоящие из промышленных, социальных и экологических подсистем, функционирующих в активном внешнем окружении под централизованным административным контролем. Они предназначены для эффективного производства товаров и услуг, подъема общественного благосостояния, оптимального перераспределения валового регионального продукта между производственной и социальной сферами, с учетом поддержания качественного состояния природных сред на рассматриваемой территории.

Региональные экономические системы относятся к категории открытых, целеустремленных и развивающихся макросистем, имеющих иерархическую структуру организации. Промышленные подсистемы демонстрируют динамичную, нелинейную и, в некотором смысле, хаотичную производственную среду, в которой отдельные виды ресурсов внезапно могут оказаться недоступными, из-за чего приходится вводить резервные ресурсы в случайные моменты времени, и где периодически возникает потребность в новых рабочих местах. Наличие социальной компоненты в РЭС делает их поведение зависимым от мотиваций социальных индивидов (элементов РЭС), что часто отражается на смене способов организации экономических систем.

Региональные экономические системы почти невозможно описать математически полно и детально, особенно это касается их экологических подсистем,

поэтому приходится искать компромисс между простотой описания отдельных звеньев (элементов, подсистем) и необходимостью учета важнейших поведенческих реакций всей системы. Разрешение данного компромисса достигается на основе иерархического многоуровневого описания.

Инфраструктурные объекты (**ИО**) являются основой социально-экономического развития РЭС. К ним относятся энергетические, транспортные, медицинские, телекоммуникационные, жилищно-коммунальные, образовательные и ряд других, от состояния которых зависит производительность труда в промышленных подсистемах и конкурентоспособность регионов во внешней социально-экономической среде. Инфраструктурные объекты относятся к категории сетевых организаций обслуживания населения различными видами производимых благ и, одновременно с этим, объединения всех вышеназванных типов подсистем в единое целое. Последнее обстоятельство улучшает стабильность РЭС и, в определенной мере, предсказуемость их поведения. В задачах управления цели развития РЭС и ИО должны быть согласованы. Это означает, что если P – универсальное цифровое множество целевых показателей развития РЭС, R – соответственно множество показателей ИО, тогда R является подмножеством множества P : $R \subseteq P$.

Жизненный цикл РЭС обычно ничем не ограничен и может составлять десятилетия, отчего экономические системы такого уровня автоматически оказываются объектами планирования и управления в проблеме регионального устойчивого развития по причине обязательного учета интересов людей, рождение которых ожидаемо через 20 и более лет. Пространственные границы РЭС могут расширяться в зависимости от выбранной стратегии развития региона.

Под *устойчивой экономической системой* понимают такую систему, «которая открыто стремится к сохранению всего ограниченного капитала, возобновляет отдельные элементы других видов природного капитала и(или) использует добавки к искусственному капиталу для замены истощающихся ресурсов других видов природного капитала» [1]. При этом контроль за устойчивостью должна выполнять система менеджмента.

В процессе экономической деятельности РЭС осуществляют расширенное воспроизводство своего потенциала и положения, то есть эволюционируют под действием разного рода вызовов (возмущений). В этой связи возникла новая модель развития экономических систем, а именно – эволюционная, в рамках которой «экономические процессы рассматриваются как спонтанные, открытые и необратимые; они порождены взаимодействием внешних и внутренних факторов и проявляются в изменении структуры экономики и действующих в ней агентов. Особое внимание уделяется процессу инноваций – появлению, закреплению и распространению нового; конкуренции как процессу отбора, а также проблемам информации, неопределенности, времени» [2]. В целеустремленных РЭС эволюция приобретает направленный характер вследствие работы систем административного управления.

В 1916 г. А. Файоль выразил смысл управления словами: «Управлять – значит предвидеть, организовывать, распоряжаться, координировать и контролировать» [3]. Интерпретация данного определения в парадигме системной экономики [4] позволяет рассматривать процесс управления в виде комбинаций последовательно-параллельных «элементарных» действий. По отношению ко времени управление РЭС заключается в достижении заданных значений показателей в интересные моменты времени. При этом реализуются следующие элементарные действия:

- задание (прогнозирование) целевых уровней показателей, достижение которых необходимо обеспечить в контрольные моменты времени;
- осуществление действий, способствующих достижению целевых уровней.

Здесь действия первого типа относятся к «планированию будущего состояния», второго – к «распоряжению». По отношению к пространственному измерению предметной сферы деятельности РЭС управление осуществляется с помощью специальной административно-организующей структуры, в которой формируются узловые элементы принятия решений, через которые реализуется основная цель управления. Такие действия ассоциируются с «организацией». При этом единство или интеграция предметной сферы достигается за счет «координации» действий всех агентов иерархической системы, а функция централизованного контроля отводится администраторам.

Математическая теория управления многоуровневыми иерархическими системами развивается с середины 60-х годов прошлого века. Особую известность получили работы М. Месаровича, Д. Мако и И. Такахары [5], где систематически исследуются математические модели иерархических структур управления и анализируются преимущества, которые может дать применение многоуровневого описания в практических случаях [6].

Известны три основных типа иерархических многоуровневых систем управления: 1) стратифицированные; 2) многослойные; 3) многоэшелонные.

Первый тип имеет дело с системой моделей, каждая из которых описывает поведение объекта управления с точки зрения выбранных исследователем уровней абстрагирования. Эти уровни именуются *стратами*. Для каждой из них существует ряд характерных особенностей (переменных, законов, принципов), с помощью которых и описывается поведение объекта. Нижним стратам даются более подробные и специфичные описания, чем находящимся над ними.

Второй тип иерархической организации относится к сложностям процессов принятия решений в условиях неопределенности. Для этого процессы принятия решений представляют в виде семейства последовательно соединенных более простых подпроблем таким образом, чтобы их решение позволило решить и исходную проблему. Функциональную иерархию принятия решений называют *многослойной системой управления*. В ее основе: 1 – выбор стратегии принятия решений; 2 – уменьшение неопределенности с помощью подходящих методов обучения; 3 – поиск допустимого способа действий, удовлетворяющего заданным ограничениям.

Третий тип организационной иерархии – многоэшелонный. Он допускает наличие конфликтов целей и задач при решении подпроблем и имеет ряд важных особенностей [5]: 1 – система состоит из семейства четко выделенных взаимодействующих подсистем; 2 – часть из этих подсистем является «решающими» элементами; 3 – принимающие решения элементы располагаются иерархически, то есть находятся под влиянием или управлением других решающих элементов.

Эффективность результатов работы многоуровневых систем зависит от двух базовых процессов: декомпозиции общей задачи на локальные задачи меньшей размерности и объединения их решений на основе выбранного принципа координации.

Поскольку РЭС являются характерными примерами организаций со сложной структурой, механизм принятия управленческих решений для них следует разрабатывать на основе теории иерархических многоуровневых систем. При этом необходимо учитывать тот факт, что время функционирования РЭС соответствует десятилетиям, а долгосрочные цели управления могут быть достигнуты только в результате перехода системы на траекторию устойчивого развития. В статье [7] содержится описание трехуровневой системы менеджмента устойчивого развития, основанной на идеях иерархических многоуровневых систем управления.

В процессе работы промышленных подсистем в них возникают отказы и повреждения оборудования, износ машин и механизмов, простои из-за нарушения

графиков поставок сырья и материалов, запаздывания и искажения в информационных и управляющих каналах, а также множество других событий, в результате которых технологическое оборудование из работоспособного состояния переходит в неработоспособное, предельное, опасное [8]. Вследствие этого менеджеры разрабатывают меры по повышению надежности РЭС и на их основе модернизируют подсистему и ее элементы.

Особое значение для РЭС представляют проблемные или «климаксные» ситуации, в которых система выходит на границу своих потенциальных возможностей и уже не способна продвигаться к намеченным целям устойчивого развития (ЦУР). Из таких ситуаций требуется переводить систему в нормальные целеустreмленные состояния посредством их реструктуризации [9]. Но для этого необходимо диагностировать состояния РЭС либо с помощью специальных процедур, предусмотренных в системе управления, либо на основе проведения экспертных обследований.

Цель настоящей работы заключается в описании методов диагностики проблемных ситуаций, возникающих в процессе длительной эксплуатации инфраструктурных объектов РЭС.

Классификация и диагностика возмущений в промышленных подсистемах РЭС

Экономический прогресс в регионах РФ ассоциируется с ростом общественного благосостояния, увеличением производственных мощностей, расширением экспорта товаров и услуг, с применением систем цифрового технологического и административного управления. Вместе с тем укрупнение промышленных предприятий ведет к росту объемов потребления природных ресурсов и увеличению отходов производства, усложнению технологического оборудования, поиску новых логистических маршрутов и появлению непредвиденных нештатных ситуаций. В итоге с ростом производства, так или иначе, возрастают экономические и экологические потери.

Мировая практика анализа надежности производственных систем свидетельствует о необходимости разработки теоретических и прикладных методов раннего обнаружения нештатных ситуаций в целях снижения вероятности возникновения опасных остановок производства, повреждения оборудования и несчастных случаев с персоналом, а также улучшения обслуживания технологического оборудования [10]. Например, в 90 компаниях Швеции, представляющих ее обрабатывающую промышленность, производительность оборудования с 2006 по 2012 гг. в среднем составляла 51,5 %. В этой связи Ассоциация шведской машиностроительной промышленности продвигает концепцию планирования к 2030 г. производственных систем, свободных от действия возмущений. В основу концепции положена идея всеобъемлющей эффективности производства (Overall Equipment Effectiveness – ОЕЕ) [11]. Она реализуется на основе подхода «снизу-вверх», в котором все участники производства работают над устранением шести основных типов потерь, связанных: 1 – с отказом оборудования; 2 – сменой или корректировкой заданий; 3 – холостыми прогонами и кратковременными простоями; 4 – снижением темпов производства; 5 – уменьшением производительности; 6 – дефектами качества продукции. В 2014 г. Институт ОЕЕ предложил «Промышленный стандарт ОЕЕ» с рекомендациями о том, как определять потенциальные потери производства [12].

Своевременное выявление и идентификация возмущений имеют особый смысл для решения задач устойчивого развития, поскольку в процессе длительного времени работы РЭС промышленные и экологические подсистемы претерпе-

вают и такие воздействия, которые способны качественно (необратимо) изменять свои состояния.

Цели обнаружения и диагностики технологических возмущений состоят в следующем [10]:

- обнаружение зарождающейся неисправности;
- раннее выявление аномального состояния объекта;
- определение в реальном масштабе времени причин неудовлетворительной работы оборудования;
- предсказание негативных тенденций развития технологического процесса;
- выбор подходящего способа обнаружения нештатных ситуаций;
- диагностика причин появления неисправности после ее обнаружения.

Для задач устойчивого развития РЭС к вышеназванным необходимо добавить еще одну цель – диагностику проблемных (климаксных) состояний, устранение которых невозможно осуществить без реструктуризации объекта управления и(или) его системы административного контроля.

Под *возмущением* в литературе часто понимают слова, близкие по смыслу: «нарушение», «неполадка» и «неисправность». Согласно [11], производственными возмущениями (production disturbances) являются: «...дискретные или непрерывные, плановые или незапланированные нарушения или изменения, возникающие в течение рабочего времени и способные повлиять на доступность, производительность, качество продукции, безопасность, рабочие условия, окружающую среду и т.п.». Для экологических подсистем возмущением является: «...любое относительно дискретное событие во времени, которое разрушает экосистему, сообщество или структуру популяции, изменяет ресурсные резервы, доступность субстрата или физическую окружающую среду» [13].

Производственный и экологический мониторинги содействуют систематической работе над улучшением состояния ИО РЭС. Однако холистический подход к обнаружению, измерению и обращению с возмущениями возможен только в системах управления [14, 15]. В публикации [10] термины «нарушение» и «неполадка» рассматриваются как синонимы. Причем под нарушением понимается минимальное изменение эксплуатационных качеств, а под неисправностью – полная невозможность работы оборудования. Такой точки зрения будем придерживаться и в настоящей работе.

Диагностика проблемных состояний подсистем

На рисунке 1 изображен фрагмент потока событий, связанных с возникновением разного рода неполадок в промышленной подсистеме РЭС. Каждой неполадке соответствует определенное состояние подсистемы $h(t_i, x_{1i}, x_{2i}, x_{3i})$, где t_i – случайные моменты времени; x_{1i}, x_{2i}, x_{3i} – координаты траектории движения РЭС в многомерном пространстве экономических, экологических и социальных показателей соответственно.

На диаграмме отмечены диапазоны возможных состояний подсистемы: с неполадками (h_0, h_{\min}) & (h_{\max}, h_{ps}) ; нормального функционирования $[h_{\min}, h_{\max}]$; пороговые значения неисправных h_0 и проблемных h_{ps} ситуаций.

Неисправное или терминальное состояние оборудования h_0 обнаруживать несколько проще, чем выявлять неполадки. Успех во многом зависит от компетентности обслуживающего персонала. Однако в системах автоматизированного управления предприятием применяют математические методы диагностики, позволяющие обнаруживать также и зарождающиеся нарушения. В [10] методы диагностики разделены на две основные группы: 1 – оценивание переменных и параметров процессов; 2 – распознавание образов поведения процессов.

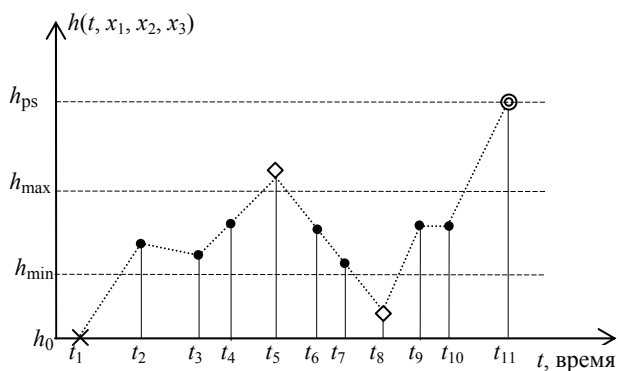


Рис. 1. Диаграмма дискретных состояний функционирования промышленной подсистемы:

- – нормальное состояние; ◇ – неполадка; × – неисправное (нерабочее) состояние;
- ⊙ – проблемное состояние; ... – промежуточные непрерывные состояния

Для задач устойчивого развития РЭС особенно важна диагностика состояний h_{ps} , методы определения которых на сегодня недостаточно развиты. Выход РЭС на h_{ps} побуждает менеджеров к реструктуризации (эволюции) экономической системы. Между h_0 и h_{ps} существуют многие другие состояния функционирования РЭС, которые можно охарактеризовать как «промежуточные».

Если любое из состояний $h_i \in (h_0, h_{ps})$ принимает в общей сложности k_i различных значений, каждое из которых имеет соответствующую вероятность появления p_{ij} , $j = \overline{1, k_i}$, тогда меру неопределенности состояния h_i можно оценить через энтропию [16]:

$$H_i = - \sum_{j=1}^{k_i} p_{ij} \ln p_{ij}. \quad (1)$$

Поскольку для всех $j = \overline{1, k_i}$ справедливо неравенство $0 \leq p_{ij} \leq 1$ с дробными значениями p_{ij} , H_i – неотрицательная величина. В особых случаях, когда h_0 или h_{ps} имеют вероятности появления $p_{ij} = 1$, для них величина $H_i = 0$, так как неопределенности в этих случаях нет и $\sum_{j=1}^{k_i} p_{ij} = 1$.

При равномерном законе появления h_i : $p_{ij} = 1/k_i$; $j = \overline{1, k_i}$ величина энтропии двух предельных состояний h_0 и h_{ps} соответствует графику на рис. 2. Максимальная энтропия равна 0,639. При увеличении k_i энтропия возрастает. Для равномерного закона распределения h_i энтропия вычисляется по формуле $\ln(k_i)$.

При равномерном законе появления h_i : $p_{ij} = 1/k_i$; $j = \overline{1, k_i}$ величина энтропии двух предельных состояний h_0 и h_{ps} соответствует графику на рис. 2. Максимальная энтропия равна 0,639. При увеличении k_i энтропия возрастает. Для равномерного закона распределения h_i энтропия вычисляется по формуле $\ln(k_i)$.

В [11] приведены результаты диагностирования неполадок на предприятиях обрабатывающей промышленности Швеции в 2001 и 2014 гг. Сведения о неполадках получены в системах промышленного мониторинга. В 2001 г. необходимую информацию предоставили 80 компаний, в 2014 г. – 71 компания. Названы типы 21 неполадки. Результаты оценок неполадок разных лет во многом

совпадали. Наибольшую долю в производственных потерях имеют неполадки в оборудовании, дефекты в программном обеспечении и медийные ошибки. Классификация неполадок по данным работы [11]:

- неполадки в работе оборудования;
- человеческий фактор;
- неполадка внешнего характера;
- дефекты в программном обеспечении промышленного оборудования;
- перепрограммирование;
- ошибка планирования;
- смена инструмента;
- время замены/заправки материала;
- настройки/установки на нуль;
- регулировка;
- профилактика;
- уборка;
- рабочие встречи;
- паузы или перерывы;
- временные задержки поставляемого продукта/материала;
- остановка выходного потока;
- нехватка персонала;
- медиаошибка;
- потеря скорости;
- брак или проблема с качеством продукта;
- инциденты/промахи.

При равновероятном возникновении указанных неполадок максимальная неопределенность производственных состояний оценивается величиной $H \cong 3$. Для уменьшения энтропии в процессе управления необходимо знать совместную плотность вероятности появления нарушений. Для этого требуется на длительном интервале времени работы оборудования накапливать информацию о нарушениях, используя известные методы их обнаружения и диагностики в системе оперативного управления производством. В функцию такой системы входит конкретизация задач на основе оперативной информации о состоянии промышленной подсистемы в целях уменьшения влияния возмущающих воздействий. В иерархии стратегических, тактических и оперативных задач с диагностикой возмущений последние находятся на самом нижнем (полевом) уровне [9]. Решения, вырабатываемые системой оперативного управления с диагностикой, в отличие от других, соответствуют не множеству возможных возмущений с определенной вероятностной мерой, а каждой возникающей реализации возмущения (неполадки).

Перечисленные неполадки соответствуют приведенному выше определению производственных возмущений. Неполадки не приводят к отказам промышленных подсистем. По терминологии теории надежности они должны рассматриваться как повреждения. Большинство неполадок легко диагностируется в системах мониторинга. Только в некоторых случаях может потребоваться специальное измерительное оборудование со своим программным обеспечением или аналитики по обнаружению ошибок, связанных с «человеческим фактором».

Неординарность появления в РЭС проблемных состояний заключается в том, что события такого рода относятся к разряду редких, связанных с действием качественно новых вызовов (возмущений), не актуальных на этапе планирования сис-

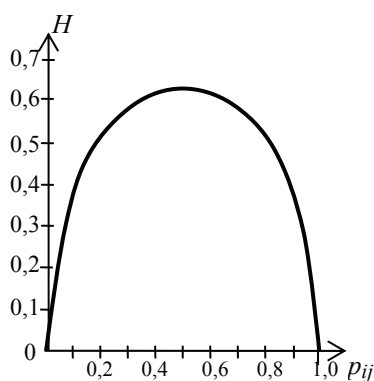


Рис. 2. Энтропия состояний h_0 и h_{ps} с вероятностями p_{ij} и $(1 - p_{ij})$

темы, но крайне важных с момента обнаружения h_{ps} . Во многих случаях обнаружение и диагностика h_{ps} предполагает длительную работу сети мониторинга [13].

Состояния h_0 и h_{ps} являются предельными, независимыми и несовместимыми. Они означают неработоспособные состояния подсистемы. Различие между ними, прежде всего, кроется в различии причин для их появления. В работе [10] приведены описания технологических дефектов, из-за которых часто возникают h_0 . Устранив дефекты, можно восстановить работоспособность подсистемы. Для h_{ps} таких возможностей нет. Это качественно иной тип состояний, возникающих по другим обстоятельствам. На схеме рис. 3 названы четыре класса возмущений – А, В, С и D, вследствие которых подсистема переходит в состояния h_{ps} .

К классу детерминированных возмущений относятся директивные изменения в нормативно-правовой и технологической документации (обновление законов, ГОСТов, ТУ, СанПиНов и др.). Сюда же относятся критические увеличения нагрузок на подсистемы, возникшие по объективным причинам в процессе длительного развития РЭС: например, увеличение потоков воды на входе городских очистных сооружений из-за роста ЖКХ, необходимость очистки воды от примесей, не предусмотренных регламентом и т.п. Диагностика состояний h_{ps} при появлении детерминированных возмущений для менеджеров особого труда не составляет. В системе оперативного управления она сводится к формальной процедуре сопоставления действующих характеристик подсистем с новыми к ним требованиями. Модель возмущений класса А можно описать известной функцией Хевисайда $\theta(t)$: $\theta(t) = 1, t \geq 0, \theta(t) = 0, t < 0$. Здесь t – время появления возмущения в подсистеме.

К классу нестационарных возмущений необходимо отнести многочисленные неполадки, возникающие в процессе естественного старения оборудования, трубопроводов, коммуникационных сетей и т.д. Сюда могут входить и «нестыковки» старого оборудования с его обновленными компонентами. Пространственная распределенность ИО приводит к ситуациям, в которых износ однотипных комплектов оборудования происходит по-разному, что затрудняет процедуру диагностики их состояний.



Рис. 3. Схема причин появления проблемных ситуаций (ПС – предельное состояние)

Если H_p – множество всех работоспособных состояний подсистемы из интервала (h_0 и h_{ps}), T – плановое время ее эксплуатации, тогда пространство работоспособных состояний представимо в виде декартова произведения $H_c = H_p \times T$. Оценка исправных состояний в H_c – вероятность безотказной работы подсистемы $P(t)$, а возможность оказаться в неисправных состояниях h_0 или h_{ps} определяется вероятностью отказа $Q(t) = 1 - P(t)$.

Ранее отмечалось, что неполадки не являются причинами перехода подсистемы в неработоспособные состояния, однако частое их возникновение в период плавной деградации оборудования, вкупе с отказами, приводит к значительному росту расходов на обслуживание техники, ее ремонту и т.п. И в этой связи перед менеджерами компаний объективно возникает вопрос о признании работоспособного состояния подсистемы проблемным. При этом решение об эволюции подсистемы должно приниматься из чисто экономических соображений. Например, по критерию «затраты – выгоды». Отсюда основной смысл обнаружения и диагностики неполадок заключается в предупреждении экономических потерь.

Прогнозирование случайных событий, ассоциируемых с потоком неполадок, возможно при использовании вероятностных моделей. В рассматриваемом случае – распределения Пуассона [17]. Его называют законом редких событий. В работе [18] закон Пуассона является основой для описания феноменологических процессов накопления повреждений в конструкционных материалах в целях прогнозирования надежности изделий.

Для потока событий, удовлетворяющего требованиям стационарности, ординарности и отсутствия последствия, закон Пуассона имеет вид

$$P(X = m) = P_m = \frac{a^m}{m!} e^{-a}, \quad (2)$$

где P_m – вероятность появления числа событий (неполадок) в заданном интервале времени t ; $a = M[X]$ – среднее число событий, приходящихся на интервал времени t . Заметим, что формула (2) применима для периода нормальной эксплуатации оборудования подсистемы, на котором $a = \lambda t$, где λ – параметр потока событий.

Нестационарный поток неполадок характерен для периода старения оборудования. И в этом случае закон Пуассона имеет более сложную структуру

$$P_m(\tau, t_0) = \frac{a^m}{m!} e^{-a}, \quad (3)$$

где $P_m(\tau, t_0)$ – вероятность появления событий на участке времени ($t_0, t_0 + \tau$); a – математическое ожидание числа событий на этом участке, определяемое выражением

$$a = \int_{t_0}^{t_0+\tau} \lambda(t) dt, \quad (4)$$

с плотностью распределения промежутков времени между соседними неполадками вида

$$f_{t_0}(t) = \lambda(t_0 + t) \exp\left(-\int_{t_0}^{t_0+t} \lambda(t) dt\right), \quad t > 0. \quad (5)$$

В процессе длительной эксплуатации промышленной подсистемы должны накапливаться экспериментальные данные обо всех типах неполадок, а на их основе производиться параметрическая идентификация моделей (2) и (3) известными

ми методами математической статистики, с использованием критериев согласия типа χ^2 , Колмогорова–Смирнова или др. [17].

Зная вид и параметры потока неполадок, можно рассчитать P_m для любого наперед заданного числа событий $m = 0, 1, \dots, \infty$ на интервале $(t_0, t_0 + \tau)$. Затем по значениям P_m , полученным для однородных потоков неполадок, можно оценить риск экономических потерь по формуле

$$R_i = P_{m_i} \overline{Y}_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (6)$$

где \overline{Y}_i – ожидаемый экономический ущерб РЭС, связанный с i -м типом неполадок. Суммарный риск от n -го числа неполадок равен

$$R = \sum_{i=1}^n P_{m_i} \overline{Y}_i. \quad (7)$$

Значения R_i полезно знать при разработке проекта реструктуризации промышленной подсистемы, а P_m позволяют оценивать необходимость ее осуществления (эволюционирования).

На рисунке 4 изображена гипотетическая интегральная функция накопления расходов на обслуживание оборудования, связанных с появлением неполадок в моменты времени $0 < t_1 < t_2 < \dots < t_k$ и возникновением соответствующих им состояний $h(t_1), h(t_2), \dots, h(t_k)$. Критерием принятия решения о необходимости отнесения существующего состояния подсистемы в категорию «проблемных» h_{ps} является условие: $L > L_g$, где L и L_g – соответственно достигнутый и допустимый уровни затрат на устранение неполадок и отказов, возникших в результате деградации промышленной подсистемы РЭС.

К классу вероятностных возмущений относятся случайные явления различной природы, описываемые непрерывными случайными функциями на интересующем интервале времени. Воздействуя на входы подсистем, они вызывают случайные колебания переменных состояния РЭС. Примерами таких возмущений являются: нестабильность рынков, сезонный характер деловой активности, изменение спроса на товары и услуги и т.п.

В промышленных подсистемах они проявляются в виде флуктуационных помех радиосвязи, в форме сейсмических и ветровых нагрузок на строительные конструкции, спонтанных вибраций в машинах и аппаратах и колебаний качества выпускаемой продукции. В экологических подсистемах случайные явления возникают при взаимодействиях экосистем с хозяйственной деятельностью людей на смежных территориях, в результате периодических изменений погодных условий и даже при взаимодействиях популяций.

В таких случаях сложность диагностики состояний h_{ps} объясняется случайным характером поведения возмущений. При этом основная задача состоит в определении критерия или правила, позволяющего вовремя принимать решения

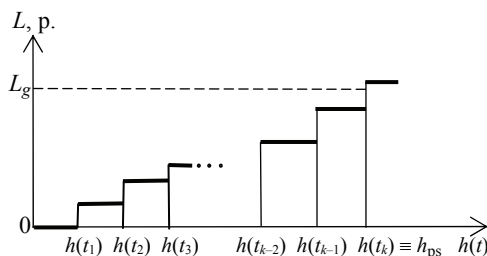


Рис. 4. Рост затрат на устранение неполадок

о необходимости реструктуризации подсистем РЭС в условиях действия возмущений класса С.

Математической моделью для описания случайных возмущений может служить случайная функция $\overset{\circ}{x}(t)$ с нулевым средним значением, представленная в форме канонического разложения [17]

$$\overset{\circ}{x}(t) = \sum_{k=0}^{\infty} (U_k \cos \omega_k t + V_k \sin \omega_k t), \quad (8)$$

где U_k, V_k – некоррелируемые случайные величины с нулевым математическим ожиданием и одинаковыми дисперсиями для каждой пары U_k, V_k с одинаковыми индексами; ω_k – частота гармонических колебаний со случайной амплитудой; t – время.

В результате действий возмущений из класса С пороговые значения, характеризующие максимальную пропускную способность подсистем, например по производительности или качеству производимых продуктов, случайным образом могут пересекаться с их реальными значениями в интервале времени $(0, T)$. Такие задачи называют «задачами о пересечениях» [19, 20]. Статистические характеристики пересечений представляют интерес и с точки зрения параметров процессов, и в аспекте решения практических задач.

Одна из задач характерна для станций водоподготовки: просачивание загрязнений в водоносный горизонт часто приводит к случайным колебаниям концентраций примесей и превышениям значений ПДК. Такие явления отражаются в отчетах кратностью превышения ПДК, безотносительно к их продолжительности. Способна ли при этом станция очищать воду – сказать затруднительно.

На рисунке 5 приведен фрагмент случайных изменений концентрации примеси $c(t)$ в водоносном горизонте. Интервалы $(t_1, t_2), (t_3, t_4)$ обозначают время нахождения $c(t)$ над уровнем γ , символизирующим ПДК.

Положим

$$r(t) = \begin{cases} (c(t) - \gamma), & \text{если } c(t) > \gamma; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Найдем среднее значение $c(t)$, превышающее γ на $(0, T)$,

$$\bar{c}(T) = \frac{1}{T} \int_0^T r(t) dt. \quad (9)$$

Правило, согласно которому производится замена оборудования станции очистки, запишем в виде

$$P[\bar{c}(T) > \gamma] \geq 1 - \varepsilon, \quad (10)$$

где P – символ вероятности; ε – достаточно малое положительное число, определяемое экспериментально на стадии проектирования станции.

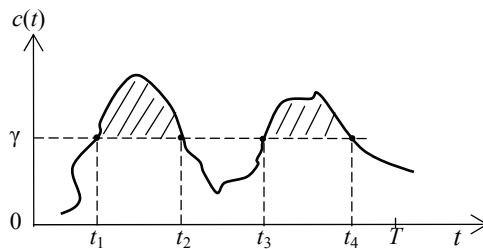


Рис. 5. Изменение состояния качества воды

К классу эмерджентных возмущений относятся непредвиденные в системе административного управления (САУ) изменения состояний подсистем, связанные с постоянным ростом статической сложности объектов РЭС в процессе их эволюционного развития. Возмущения класса D могут порождать запаздывания в информационных каналах, дублирование функций, нарушение координации, конфликты и другие неполадки, вызывающие экономические потери по линии административного управления. В подобных ситуациях требуется реконструировать САУ с учетом новых состояний подсистем, включив в ее состав функцию обнаружения и диагностики неполадок «эмерджентного» типа.

Число неполадок может оказаться весьма значительным, поскольку САУ являются широкопрофильными социотехническими системами обработки данных, предназначенными для эффективного контроля за всеми бизнес-процессами в подсистемах РЭС со стороны руководящих и финансовых органов [21]. Цели САУ множественны: 1 – информационное обеспечение процессов принятия решений на всех уровнях; 2 – планирование и прогнозирование производственной деятельности; 3 – консолидация финансовых и административных ресурсов для решения поставленных задач. Социальной компонентой в САУ являются люди, процессы и организационные структуры, технической – потоки информации, программное обеспечение и аппаратные средства. Сущностью САУ является преобразование получаемой информации в действия по схеме: анализ данных → оценка ситуаций → выбор руководящих правил → реализация решений → оценка эффективности найденных решений.

Вопрос о реструктуризации САУ должен решаться по результатам аудита экономических потерь, произошедших по линии администрирования. При этом могут использоваться диаграммы причинно-следственных связей типа деревьев отказов или вычислительные модели с управлением, использующие сети Петри [22].

Заключение

Предложены методы диагностики проблемных (климаксных) состояний промышленных и экологических подсистем РЭС. В иерархических системах управления устойчивым развитием объектов региональной экономики данные методы необходимо включать в состав процедур диагностики отказов и неполадок, возникающих в процессе функционирования подсистем.

Список литературы

1. Экологический учет для предприятий : сб. докладов ; пер. с англ. // Конф. ООН по торговле и развитию. – М. : Финансы и статистика, 1997. – 196 с.
2. Макашева, Н. А. Эволюционная экономика / Н. А. Макашева // История экономических учений : учеб. пособие / под ред. В. Автономова, О. Ананьина, Н. Макашевой. – М. : ИНФРА-М, 2003. – С. 621 – 638.
3. Файоль, А. Общее и промышленное управление / А. Файоль ; пер. Б. В. Бабина-Кореня, предисл. А. К. Гастева. – М. : Изд-во Центр. ин-та труда, 1923. – 122 с.
4. Клейнер, Г. Б. Системная экономика как платформа развития современной экономической теории / Г.Б. Клейнер // Вопросы экономики. – 2013. – № 6. – С. 4 – 28. doi: 10.32609/0042-8736-2013-6-4-28
5. Месарович, М. Теория иерархических многоуровневых систем : пер. с англ. / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахара ; под ред. И. Ф. Шахнова. – М. : Мир, 1973. – 344 с.
6. Mahmoud, M. S. Multilevel System Control and Application: A Survey / M. S. Mahmoud // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 1977. – Vol. 7, Is. 3. – P. 125 – 143. doi: 10.1109/TSMC.1977.4309677

7. Попов, Н. С. О некоторых особенностях в постановке и решении региональных задач устойчивого развития. Часть V / Н. С. Попов, О. В. Милованова, А. А. Баламутова, Л. Н. Чуксина // *Вопр. совр. науки и практики. Ун-т им. В. И. Вернадского*. – 2022. – № 2(84). – С. 41 – 55. doi: 10.17277/voprosy.2022.02.pp.041-055
8. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения. Введ. 2017–07–01. – Текст : электронный. – М. : Стандартинформ, 2016. – 30 с. URL : <https://areliability.com/wp-content/uploads/2018/09/GOST-27.002-2015-Nadyozhnost-v-tehnike.-Terminy-i-opredeleniya.pdf> (дата обращения : 15.02.2023).
9. Попов, Н. С. О некоторых особенностях в постановке и решении региональных задач устойчивого развития. Часть III / Н. С. Попов, О. В. Милованова, А. А. Баламутова, Л. Н. Чуксина // *Вопр. совр. науки и практики. Ун-т им. В. И. Вернадского*. – 2021. – № 2 (80). – С. 16 – 32. doi: 10.17277/voprosy.2021.02.pp.016-032
10. Химмельблау, Д. М. Обнаружение и диагностика неполадок в химических и нефтехимических процессах / Д. М. Химмельблау ; пер. с англ. Ю. М. Левина. – Л. : Химия : Ленинград. отд-ние, 1983. – 352 с.
11. Bokrantz, J. Handling of Production Disturbances in the Manufacturing Industry / J. Bokrantz, A. Skoogh, T. Ylipaa, J. Stahre // *Journal of Manufacturing Technology Management*. – 2016. – Vol. 27, No. 8. – P. 1054 – 1075. doi: 10.1108/JMTM-02-2016-0023
12. OEE Industry Standard. – Текст : электронный – 2017. URL : <https://manoxblog.com/2017/04/16/oee-industry-standard/> (дата обращения : 15.02.2023).
13. Turner, M. G. Disturbance Dynamics and Ecological Response: The Contribution of Long-Term Ecological Research / M. G. Turner, S. L. Collins, A. L. Lugo, J. J. Magnuson, T. S. Rupp, F. J. Swanson // *BioScience*. – 2003. – Vol. 53, No. 1. – P. 46 – 56. doi: 10.1641/0006-3568(2003)053[0046:DDAERT]2.0.CO;2
14. Leitao, P. Predictive Disturbance Management in Manufacturing Control Systems – Текст : электронный / P. Leitao, F. Restivo. – 2004. – URL : <https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/1546/1/2004-IMSForum.pdf> (дата обращения : 15.02.2023).
15. Frizelle, G. Disturbance Measurement in Manufacturing Production Systems / G. Frizelle, D. McFarlane, L. Bongaerts // *Proc. of ASI'98. Bremen, Germany*. – June, 1998. – P. 1 – 12.
16. Шеннон, К. Э. Работы по теории информации и кибернетике : сб. ст. / К. Э. Шенон ; под ред. Р. Л. Добрушина и О. Б. Лупанова. – М. : Изд-во иностранной литературы, 1963. – 829 с.
17. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей : учеб. для вузов / Е. С. Вентцель. – М. : Наука, 1964. – 576 с.
18. Богданофф, Дж. Вероятностные модели накопления повреждений / Дж. Богданофф, Ф. Козин ; пер. с англ. С. А. Тимашева. – М. : Мир, 1989. – 341 с.
19. Крамер, Г. Стационарные случайные процессы: свойства выборочных функций и их приложения / Г. Крамер, М. Лидбеттер ; пер. с англ. Ю. К. Беляева и М. П. Ершова ; под ред. Ю. К. Беляева. – М. : Мир, 1969. – 398 с.
20. Тихонов, В. И. Выбросы случайных процессов / В. И. Тихонов. – М. : Наука, 1970. – 392 с.
21. Marx, F. A Maturity Model for Management Control Systems. Five Evolutionary Steps to Guide Development / F. Marx, F. Wortmann, J. Mayer // *Business & Information Systems Engineering*. – 2012. – No. 4. – P. 193 – 207. doi: 10.1007/s12599-012-0220-x
22. Питерсон, Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем / Дж. Питерсон ; пер. с англ. М. В. Горбатовой, В. А. Торхова, В. Н. Четверикова ; под ред. В. А. Горбатова. – М. : Мир, 1984. – 264 с.

Diagnostics of the Functioning States of the Regional Economy Objects in the Context of Sustainable Development

A. A. Balamutova, N. S. Popov, A. V. Andreev

*Department of Nature Management and Environmental Protection, eco@mail.tstu.ru;
TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: disturbances; troubleshooting; hierarchical management; service losses; sustainable development; economic system.

Abstract: Regional economic systems (RES) refer to systems of long-term operation, subject to a wide range of internal and external calls (disturbances). Their destabilizing action can be prevented with the help of a typical management system. However, in the tasks of managing the sustainable development of RES, the need inevitably arises for the evolution of the system due to its transition to the limiting (climax) states, diagnostics of which in management systems was not previously recognized as a necessary function. In this regard, possible methods for detecting and diagnosing such conditions are considered.

References

1. *Ekologicheskiy uchet dlya predpriyatiy* [Environmental accounting for enterprises], Proc. of the Conf. United Nations Trade and Development, Moscow: Finansy i statistika, 1997, 196 p. (In Russ.).
2. Makasheva N.A.; Avtonomov V., Anan'in O., Makasheva N.A. (Eds.). [Evolutionary economics], *Istoriya ekonomicheskikh ucheniy* [History of economic doctrines], Moscow: INFRA-M, 2003, pp. 621-638. (In Russ.).
3. Fayol' A. *Obshcheye i promyshlennoye upravleniye* [General and industrial management], Moscow: Izdatel'stvo Tsentr'k'nogo instituta truda, 1923, 122 p. (In Russ.).
4. Kleyner G.B. [System economy as a platform for the development of modern economic theory], *Voprosy ekonomiki* [Questions of Economics], 2013, no. 6, pp. 4-28. doi: 10.32609/0042-8736-2013-6-4-28 (In Russ.).
5. Mesarovich M., Mako D., Takakhara I.; Shakhnov I.F. (Ed.). *Teoriya iyerarkhicheskikh mnogourovnevnykh sistem* [Theory of hierarchical multilevel systems], Moscow: Mir, 1973, 344 p. (In Russ.).
6. Mahmoud M.S. Multilevel System Control and Application: A Survey, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1977, vol. 7, issue 3, pp. 125-143. doi: 10.1109/TSMC.1977.4309677
7. Popov N.S., Milovanova O.V., Balamutova A.A., Chuksina L.N. [On some features in setting and solving regional problems of sustainable development. Part V], *Voprosy sovremennoj nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2022, no. 2(84), pp. 41-55. doi: 10.17277/voprosy.2022.02. pp.041-055 (In Russ., abstract in Eng.)
8. GOST 27.002-2015. *Nadezhnost' v tekhnike. Terminy i opredeleniya* [Reliability in technology. Terms and Definitions], Moscow: Standartinform, 2016. 30 p. (In Russ.), available at: <https://areliability.com/wp-content/uploads/2018/09/GOST-27.002-2015-Nadyozhnost-v-tehnike.-Terminy-i-opredeleniya.pdf> (accessed 15 February 2023).
9. Popov N.S., Milovanova O.V., Balamutova A.A., Chuksina L.N. [On some features in setting and solving regional problems of sustainable development. Part III], *Voprosy sovremennoj nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo*

[Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2021, no. 2(80), pp. 16-32. doi: 10.17277/voprosy.2021.02. pp.016-032 (In Russ., abstract in Eng.)

10. Himmelblau D.M. Fault Detection and Diagnosis in Chemical and Petrochemical Processes. Amsterdam; New York: Elsevier Scientific Pub. Co.; New York: distributors for the US and Canada, Elsevier North-Holland, 1978. 414 p.

11. Bokrantz J., Skoogh A., Ylipaa T., Stahre J. Handling of Production Disturbances in the Manufacturing Industry, *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2016, vol. 27, no. 8, pp. 1054-1075. doi: 10.1108/JMTM-02-2016-0023

12. OEE Industry Standard. 2017. available at: <https://manoxblog.com/2017/04/16/oee-industry-standard/> (accessed 15 February 2023).

13. Turner M.G., Collins S.L., Lugo A.L., Magnuson J.J., Rupp T.S., Swanson F.J. Disturbance Dynamics and Ecological Response: The Contribution of Long-Term Ecological Research, *BioScience*, 2003, vol. 53, no. 1, pp. 46-56. doi: 10.1641/0006-3568(2003)053[0046:DDAERT]2.0.CO;2

14. Leitao P., Restivo F. Predictive Disturbance Management in Manufacturing Control Systems, 2004. available at: <https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/1546/1/2004-IMSForum.pdf> (accessed 15 February 2023).

15. Frizelle G., McFarlane D., Bongaerts L. Disturbance Measurement in Manufacturing Production Systems, *Proc. of ASI'98*. Bremen, Germany. June, 1998, pp. 1-12.

16. Shennon K.E.; Dobrushin R.L., Lupanov O.B. (Eds.). *Raboty po teorii informatsii i kibernetike* [Works on information theory and cybernetics], Moscow: Izdatel'stvo inostrannoy literatury, 1963, 829 p. (In Russ.).

17. Venttsel' Ye.S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory], Moscow: Nauka, 1964, 576 p. (In Russ.).

18. Bogdanoff Dzh., Kozin F. *Veroyatnostnyye modeli nakopleniya povrezhdeniy* [Probabilistic models of damage accumulation], S.A. Timashev (Trans.), Moscow: Mir, 1989, 341 p. (In Russ.).

19. Cramer H., Leadbetter M.R. Stationary and Related Stochastic Processes: Sample Function Properties and Their Applications. New York : Wiley, 1967,

20. Tikhonov V.I. *Vybrosy sluchaynykh protsessov* [Emissions of random processes], Moscow: Nauka, 1970, 392 p. (In Russ.).

21. Marx F., Wortmann F., Mayer J. A Maturity Model for Management Control Systems. Five Evolutionary Steps to Guide Development, *Business & Information Systems Engineering*, 2012, no. 4, pp. 193-207. doi: 10.1007/s12599-012-0220-x

22. Peterson J.L. Petri Net Theory and the Modeling of Systems, Englewood Cliffs, N. Y., Prentice-Hall, 1981. 290 p.

Diagnose der Funktionszustände von Objekten der regionalen Wirtschaft im Problem der nachhaltigen Entwicklung

Zusammenfassung: Regionale Wirtschaftssysteme (RWS) beziehen sich auf Systeme des langfristigen Betriebs, die einer Vielzahl von internen und externen Anrufen (Störungen) unterliegen. Ihre destabilisierende Wirkung kann mit Hilfe eines typischen Managementsystems verhindert werden. Bei den Aufgaben des Managements der nachhaltigen Entwicklung von erneuerbaren Energiequellen jedoch ergibt sich zwangsläufig die Notwendigkeit einer Weiterentwicklung des Systems aufgrund seines Übergangs in die Grenzzustände (Wechseljahre), deren Diagnostik in Managementsystemen bisher nicht als notwendige Funktion erkannt wurde. In diesem Zusammenhang sind die möglichen Erkennungsmethoden und Diagnose solcher Zustände untersucht.

Diagnostic de l'état du fonctionnement des objets de l'économie régionale dans le problème du développement durable

Résumé: Les systèmes économiques régionaux (SER) se réfèrent à des systèmes d'exploitation à long terme soumis à un large éventail de défis internes et externes (perturbations). Leur effet déstabilisant peut être évité à l'aide d'un système de gestion typique. Cependant, dans les tâches de gestion du développement durable de SER, il est inévitablement nécessaire d'évoluer le système en raison de son passage à des conditions extrêmes (climat), dont le diagnostic dans les systèmes de gestion n'a pas été compris auparavant comme une fonction nécessaire. À ce propos sont examinés les moyens possibles de détection et de diagnostic de tels états.

Авторы: *Баламутова Анна Андреевна* – аспирант кафедры «Природопользование и защита окружающей среды»; *Попов Николай Сергеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Природопользование и защита окружающей среды»; *Андреев Альберт Валерьевич* – аспирант кафедры «Природопользование и защита окружающей среды»; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.
