

УПРАВЛЕНИЕ СОСТОЯНИЕМ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ. НАУЧНЫЕ АСПЕКТЫ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ

Владов Ю.Р., Нестеренко М.Ю., Владова А.Ю., Влацкий В.В.
ФГБУН «Оренбургский научный центр УрО РАН», г. Оренбург

Состояние исследований и актуальность проблемы

Под управлением состоянием объекта понимается система сбора, хранения и анализа относительно небольшого количества существенных признаков или его параметров описания для вынесения суждения о его состоянии или поведении в целом и формирования соответствующей управленческой информации. Известно, отказы природно-техногенных объектов (ПТО) расходуют значительные материальные и экологические ресурсы. Увеличивающаяся продолжительность работы ПТО, сопровождается их износом и выдвигает проблему управления состоянием в ранг наиболее актуальных.

В ряде работ в области анализа состояния различных объектов выделены типичные механизмы отказов, составлены физико-механические и математические модели процессов его изменения на основе локальных параметров. В то же время методы локального или точечного мониторинга не отражают реальной их интенсивности изменения. Обширная диагностическая информация о повреждениях ПТО создается при использовании современных методов разрушающего и неразрушающего контроля. Однако, ее анализ затруднен из-за большой размерности задачи и невозможности использования существующих методов обработки данных с необходимостью их ранжирования и потери связи при этом с исследуемым объектом.

Среди наиболее значимых работ, посвященных широкому кругу вопросов управления объектами и технологическими процессами, следует отметить работы отечественных и зарубежных авторов [1, 2, 5], а также работы в области сбора данных, моделирования и идентификации с помощью ЭВМ [7, 8, 9], управления технологическими процессами с сосредоточенными и распределенными параметрами [10-13]. Однако, особенности ПТО не позволяют использовать соответствующие классические методы. Применяемые методы интеллектуального анализа данных, используемые в различных областях науки и техники, предназначены для выявления закономерностей, классификации и кластеризации данных и не выходят на требуемый уровень управления объектами выделенного класса.

Географические информационные системы (ГИС) представляют собой относительно новое научное направление. Теория этих информационных систем и ее отдельные приложения отражены в трудах отечественных: А.М. Берлянт, Л.М. Бугаевский, А.А. Вахромеева А.В. Замятин, Е.Г. Капралов, Р.В. Ковин, А.В. Кошкарев, Н.Г. Марков, А.В. Скворцов, В.Я. Цветков и др. и зарубежных ученых: Hunter G.J., Jensen J.R., Codd E.F., Peuquet D.J., Lauer D.T., Epstein E.E., Де Мерс М.Н., Сеймон А.Р. и многих др. Однако, многие

теоретические и прикладные вопросы еще далеки от завершения, в особенности для автоматизированных ГИС, приспособленных для управления состоянием природно-техногенных объектов, функционирующих в условиях полной или частичной неопределенности и высокой удельной концентрации различных видов энергии.

Цель – повышение эффективности функционирования и использования сложных природно-техногенных объектов длительной эксплуатации за счет разработки методологии управления их состоянием [3, 4].

Задачи данного исследования: Изложить основные теоретические положения построения методологии управления состоянием ПТО; Построить геоинформационную систему с сетью сейсмических станций; Апробировать технологии управления состоянием природно-техногенных объектов.

Декомпозиция проблемы

Ввиду масштабности и сложности фундаментальной проблемы автоматизированного управления состоянием ПТО рациональна ее декомпозиция на три этапа. На первом этапе создаются оптимальные агрегированные модели состояния. На втором этапе на их основе выявляются аппроксимирующие зависимости корреляционных функций изменения состояния и решается модифицированное интегральное уравнение Винера-Хопфа. Третий этап предусматривает формирование управленческой информации с принятием научно обоснованных решений.

Агрегированные модели

Процесс нахождения агрегированных моделей состояния ПТО рассмотрим на примере теплоэнергетического оборудования. Предлагается агрегирование вести на пяти уровнях [3]: поэлементное, покомпонентное, поагрегатное, погрупповое и общее. На рис. 1 схематично отображены первые три уровня.

Например, покомпонентное агрегирование предусматривает нахождение степени повреждения металла по трем компонентам: надежностной $S_{нк}$ в соответствии с эффективной наработкой, температурной $S_{тк}$ в зависимости от напряжения и температуры и механической компоненты $S_{мк}$ также в зависимости от эффективной температуры для каждого элемента с учетом 11-ти существенных физико-механических свойств, а также марки стали, давления и других факторов, выбранных из базы данных.

33	$S_{\text{опт агр}}$			$S_{\text{опт агр}}$		
	$S_{\text{адд1}}$	$S_{\text{мпт1}}$	$S_{\text{кмб1}}$		$S_{\text{адд м}}$	$S_{\text{мпт м}}$	$S_{\text{км м}}$

	N _{a1}			N _{q1}			N _{z1}			... α _{Na} , α _{Nq} , α _{Nz} ...						N _{am}			N _{qm}			N _{z33}			
	Агрегат 1									...						Агрегат m									
22	S ₁											...			S _n										
	S _{HK1}			S _{TK1}			S _{MK1}			...			S _{HK n}			S _{TK n}			S _{MK n}						
11	S _{HK1}			S _{TK1}			S _{MK1}			...			S _{HK n}			S _{TK n}			S _{MK n}						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	...	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		

Рис. 1 – Схема нахождения агрегированных моделей состояния энергетического котла как сложного объекта: 1 – покомпонентная; 2 – поэлементная; 3 – поагрегатная; 4 – погрупповая и 5 – общая

Выбраны весовые коэффициенты: в надежности компоненте для вероятности отказов (1) $\alpha_{Q(t)}$, номинального допускаемого напряжения (2) $\alpha_{i\bar{A}}$ и относительного количества пусков (3) $\alpha_{\bar{n}}$; в температурной компоненте для допускаемого напряжения (4) $\alpha_{\bar{A}}$, предела ползучести (5) $\alpha_{\bar{r}}$ и предела длительной прочности (6) $\alpha_{i\bar{A}}$; в механической компоненте для предела прочности (7) $\alpha_{i\bar{b}}$, предела текучести (8) $\alpha_{i\bar{b}}$, относительного удлинения (9) $\alpha_{i\bar{b}}$, относительного сужения (10) $\alpha_{i\bar{v}}$ и ударной вязкости (11) $\alpha_{o\bar{A}}$. Как видно из рис. 1, при нахождения агрегированных моделей состояния теплоэнергетического оборудования использованы: три компоненты; n элементов; m агрегатов и k схем. По результатам каждого диагностирования ПТО выявляются следующие основные закономерности: неравномерность его состояния, ухудшение по мере увеличения наработки и выделяются потенциально опасные агрегаты.

Корреляционные зависимости

Из множества построенных на основе оптимальных агрегированных моделей состояния ПТО выделяются типы корреляционных функций: авто- $R_{xx}(\tau)$, $R_{yy}(\tau)$ и взаимно- ($R_{yx}(\tau)$ при $\tau \geq 0$ и $R_{xy}(\tau)$ при $\tau < 0$). По полученным результатам нами предлагается провести замену нормированных авто- $r_{ii}(\tau)$ и взаимно- $r_{ij}(\tau)$, $r_{ji}(\tau)$ корреляционных функций аппроксимирующими зависимостями: экспоненциальными, экспоненциально косинусными, экспоненциально полиномиальными и экспоненциально косинусными [3]. В этих зависимостях коэффициенты A и B - характеризуют начальные условия; α, β_1, β_2 - показывают интенсивность затухания корреляционных функций, а ω - определяет среднюю частоту периодических составляющих случайных процессов.

Во всех случаях коэффициенты аппроксимации, характеризующие случайные процессы изменения состояния, положительные вещественные числа, что позволяет находить аналитические модели изменения состояния ПТО в символьном виде.

Аналитические модели

Аналитические модели изменения состояния ПТО найдутся при постановке задачи с входной $U_x(t)$ и выходной $U_y(t)$ оптимальными агрегированными моделями. Нужно найти оценку оператора, характеризующего интенсивность изменения состояния ПТО - $v(t)$. Для этого необходимо соблюсти требование близости случайных функций $U_y^*(t)$ выхода модели к случайной функции $U_y(t)$, являющейся выходной переменной объекта. Критерием близости случайных функций является функция потерь $\rho[u_y(t), u_y^*(t)]$, на математическое ожидание которой наложено требование минимума (1):

$$M\{\rho[u_y(t), u_y^*(t)]\} = \min. \quad (1)$$

Критерий минимума среднего риска будет выполнен при минимуме математического ожидания функции потерь и конкретной реализации случайной агрегированной модели на входе. Оператор математического ожидания или регрессия выходной переменной $U_y(t)$ относительно входной $U_x(t')$ дает оптимальную оценку оператора состояния объекта. Проводя преобразования линейных операторов [3] с учетом нормирования аппроксимирующих корреляционных зависимостей, стационарности и стационарной связанности случайных функций $U_y(t)$ и $U_x(t)$, интенсивность изменения состояния ПТО найдется по модифицированному интегральному уравнению Винера-Хопфа (2):

$$\int_0^{\infty} v(\tau) \cdot r_{xx}(t - \tau) \cdot d\tau = r_{yx}(t), \quad -\infty < t < \infty, \quad v(\tau) = 0 \text{ при } \tau < 0. \quad (2)$$

В силу единственности аналитического продолжения для функций $r_{xx}^-(t)$ и $r_{yx}^-(t)$, соответствующее уравнение имеет место для всех t . Проводя интегральные преобразования [3, 7, 10], получаем (3):

$$\int_0^t v(\tau) \cdot [r_{xx}^+(t - \tau) - r_{xx}^-(t - \tau)] \cdot d\tau = r_{yx}^+(t) - r_{yx}^-(t). \quad (3)$$

Поскольку для рассматриваемых функций существует преобразование Лапласа, то решение (6) всегда существует, и притом оно единственное. Применив преобразование Лапласа с оператором s и, учтя теорему умножения для свертки оригиналов, получим расчетное выражение для нахождения передаточной функции $G(s)$ (4):

$$G(s) \cdot [r_{xx}^+(s) - r_{xx}^-(s)] = r_{yx}^+(s) - r_{yx}^-(s). \quad (4)$$

Используя обратное преобразование Лапласа с оператором s^{-1} , находим аналитические модели, отражающие процессы изменения состояния и их интенсивности для природно-техногенных объектов. В целом, построенные на этом этапе по оптимальным агрегированным моделям корреляционные функции позволяют выделить 4 типа аппроксимирующих зависимостей с увеличивающимися по сложности описания аргументами в соответствии с установленными при длительной эксплуатации четырьмя механизмами повреждений ПТО. По найденным расчетным выражениям для модифицированного интегрального уравнения Винера-Хопфа получены 64

модели процессов изменения состояния и их интенсивностей в символическом виде.

Построение геоинформационной системы

Назначение системы - управление геодинамической активностью недр разрабатываемых месторождений в реальном времени. Система состоит из ряда сейсмостанций с общим количеством N , GPS-датчиков (GPS_1, \dots, GPS_N), сервера данных (рис. 2) и информационной подсистемы «ГИС - Недропользование». В свою очередь датчики подсистемы, входящие в сеть сейсмических станций «Нефтегаз-сейсмика» подразделяются на две группы: локальную и телесеismicкую. Из группы локальной сейсмики необходимо отметить позиционирование этих датчиков по сторонам света (N-S и E-W) и глубине залегания (Z_1, \dots, Z_N).

Основным преимуществом рассмотренной системы является гиперчувствительность к удалённым сейсмическим событиям в реальном времени. С помощью системы «Гис-Недропользование» и реконфигурацией сети, состоящей из 8 стационарных и двух передвижных сейсмических станций, на разрабатываемых месторождениях нефти и газа в Оренбургской области фиксируется в среднем 2-3 сейсмических события в месяц.

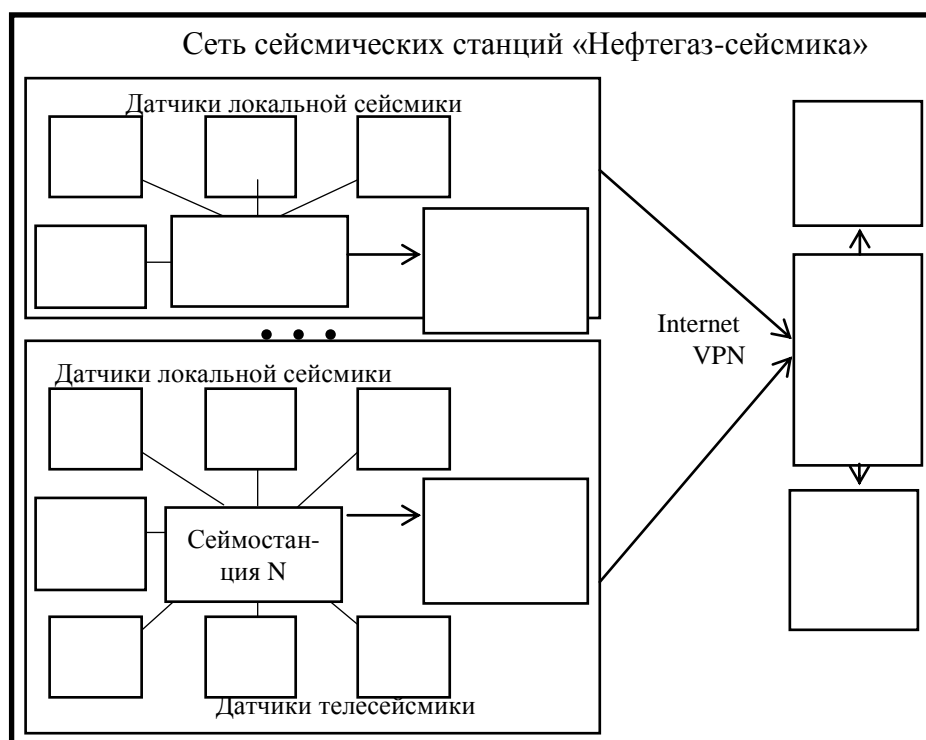


Рис. 2. Информационная система «ГИС - Недропользование» с сетью сейсмических станций «Газ-сейсмика»

Замкнутая автоматизированная система

С учетом представленной методологии и разработанного алгоритмического, изобретательского, математического и интеллектуального обеспечения разработана (рис. 3) автоматизированной системы управления

состоянием ПТО, содержащая в прямой цепи, кроме группы однородных объектов, службу надзора и диагностики, а также устройство для выполнения операций по неразрушающему контролю. Цепь отрицательной обратной связи, замыкающая автоматизированную систему, составлена из базы знаний и программного комплекса, выполняющего в автоматизированном режиме операции по нахождению оптимальных агрегированных моделей, выявлению по результатам аналитической идентификации в текущее и прогнозное время потенциально опасных агрегатов и формирование управленческой информации.

Замкнутая автоматизированная система управления состоянием ПТО состоит из следующих блоков: 1 – база знаний о повреждениях и аналитических моделях изменения состояния в символьном виде; 2 – построение и нахождение оптимальных агрегированных моделей; 3 – выявление по результатам аналитической идентификации потенциально опасных агрегатов; 4 – выявление по результатам прогнозирования потенциально опасных агрегатов в прогнозное время; 5 – формирование управленческой информации на момент последнего диагностирования для восстановления потенциально-опасных агрегатов; 6 – формирование управленческой информации для восстановления потенциально-опасных агрегатов в прогнозное время; 7 – организация, занимающаяся техническим обслуживанием и ремонтом природно-техногенных объектов; 8 – группа однородных природно-техногенных объектов; 9 – устройство для выполнения операций по неразрушающему контролю в автоматизированном режиме.

Основные информационные векторы, отмеченные на схеме, много компонентные. Ниже дается их расшифровка: $Q_0(H_{кр}, h_{кр}, a_{кр}, L_{кр}, D_{кр})$ – вектор с информацией о критических или опасных повреждениях, подлежащих вырезке эксплуатирующей организацией или требующих отдельного контроля. Здесь, $H_{кр}, h_{кр}, a_{кр}, L_{кр}, D_{кр}$ – критические толщины стенки в районах повреждений, критические глубины и длины повреждений, а также местоположение и количество критических повреждений; $Q_1(H^*, h^*, a^*, L^*, D^*)$ – вектор с той же информацией о повреждениях за исключением критических; $Q_2(S_{хopt}, S_{уopt}, L, D)$ – вектор с информацией о входных и выходных агрегированных моделях для каждого участка, также их местоположении и количестве; $Q_3(S_{ор}, L_{ор}, D_{ор})$ – вектор с информацией о потенциально опасных участках в исследуемом ПТО после проведения аналитической идентификации, в частности, величине состояния $S_{ор}$, местоположении $L_{ор}$ и количестве $D_{ор}$; $Q_4(S_{ор_}, L_{ор_}, D_{ор_})$ – вектор с информацией о потенциально опасных участках в исследуемом ПТО после прогнозирования, в частности, величине состояния $S_{ор_}$, местоположении $L_{ор_}$ и количестве $D_{ор_}$; $Q_5(S_{v_}, L_{v_}, D_v)$ – вектор с информацией о вариантах восстановления состояния потенциально опасных участков в исследуемом ПТО после проведения аналитической идентификации, в частности, величине состояния S_v до и после восстановления, местоположении L_v предназначенных для восстановления повреждений и их количестве D_v ; $Q_6(S_{v_}, L_{v_}, D_{v_})$ – вектор с информацией о вариантах восстановления состояния потенциально опасных участков в исследуемом ПТО после проведения прогнозирования, в частности,

величине состояния $S_{v_}$ до и после восстановления, местоположении $L_{v_}$ предназначенных для восстановления повреждений и их количестве $D_{v_}$;

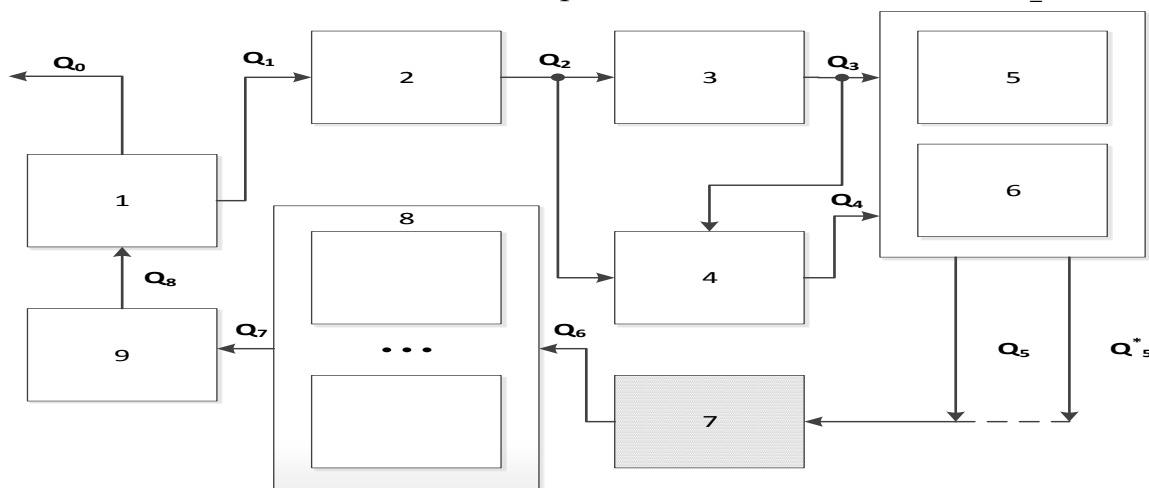


Рис. 3 – Функциональная схема замкнутой автоматизированной системы управления состоянием природно-техногенных объектов

$Q_7(S_0, L_0, D_0)$ – вектор с информацией об оставшихся без восстановления потенциально опасных участках в исследуемом ПТО в связи с ограниченными возможностями эксплуатирующей организации, в частности, величине состояния S_0 , местоположении L_0 и их количестве D_0 ; $Q_8(H_r, h_r, a_r, b_r, L_r, D_r)$ – вектор с информацией о всех распознанных в результате, например, неразрушающего контроля повреждениях внешней и внутренней поверхности оболочки ПТО и их параметрах, включающих толщину стенки H_r в районе каждого повреждения, глубину h_r , длину a_r , ширину b_r , месторасположение L_r , а также их количестве D_r . Q_9 – вектор, поступающий на второй вход блока 7 и несущий информацию о нормативно-технических требованиях (на схеме не показан).

В целом автоматизированная система управления состоянием ПТО представляет собой более совершенную замкнутую систему, в которой блоки 7, 8 и 9 образуют прямую цепь, а блоки 1 – 6 составляют цепь обратной связи. В целом, сформированная информация на выходе блоков 5 и 6 (вектора Q_5 и Q_5^*) позволяет корректировать организацию, содержание и стратегию обслуживания и ремонта, тем самым существенно повысить эффективность функционирования природно-техногенных объектов.

Выводы

Использование полученных результатов обозначенной проблемы по управлению состоянием природно-техногенных объектов играет заметную роль в развитии инновационного потенциала региона, а в учебном процессе существенно повышает уровень аэрокосмического образования в ОГУ.

Анализ опубликованных сведений по управлению состоянием объектов, сбору данных, моделированию и идентификации, управлению технологическими процессами с сосредоточенными и распределенными параметрами, Data Mining, а также патентный анализ позволяет уверенно констатировать значительную актуальность проблемы.

Предложенная декомпозиция проблемы на три этапа оптимальна, причем наиболее трудоемкий, требующий значительных информационных ресурсов – второй этап позволяет получить аппроксимирующие зависимости корреляционных функций изменения состояния техногенных объектов и решить модифицированное интегральное уравнение Винера-Хопфа с нахождением соответствующих моделей изменения состояния в символьном виде.

Использованные в исследовании агрегированные модели состояния по объективным причинам значительно информативнее локальных моделей, а также обладают рядом эмерджентных свойств, из которых в первую очередь следует выделить сглаживающий эффект, позволяющий применять линейный математический аппарат в виде обыкновенных дифференциальных уравнений.

Полученные в исследовании модели процессов изменения состояния и их интенсивностей апробированы на целом ряде ПТО и, как установлено, с достаточной точностью отражают различные механизмы их повреждения;

Регистрация сейсмических событий в недрах разрабатываемых месторождений углеводородов сложная проблема, требующая установки локальных и телесеизмических датчиков и построения автоматизированной геоинформационной системы на их основе. Разработанная система, состоящая из сети сейсмических станций «Нефтегаз-сеймика» и информационной подсистемы «ГИС - Недропользование», позволяет решить проблему на достаточно высоком научном и практическом уровнях.

Девять основных информационных векторов позволяют замкнуть автоматизированную систему управления состоянием природно-техногенных объектов, а информационное наполнение векторов позволяет проследить интеллектуальное преобразование информации для реализации эффективного управления состоянием объектов природно-техногенного характера. Разработанная технология апробирована также при управлении геодинамической активностью недр разрабатываемого месторождения углеводородов [14].

Список литературы

- 1. Алиев Р. А. Производственные системы с искусственным интеллектом / Р. А. Алиев, Н. М. Абдикеев и др. – М.: Радио и связь, 1990. – 264 с.*
- 2. Владов Ю. Р. Идентификация технического состояния теплоэнергетического оборудования: монография / Ю. Р. Владов, В. М. Кушнарченко, А. Ю. Володова, Е. П. Степанов и др. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004. - 200 с.*
- 3. Владов Ю. Р. Построение и моделирование систем интеллектуального управления состоянием техногенных объектов: монография / Ю. Р. Владов, А. Ю. Володова. - Оренбург: ООО ИПК "Университет", 2013. - 243 с.*
- 4. Владов Ю. Р. Систематизация математических моделей при аналитической идентификации технического состояния промышленных объектов / Ю. Р. Владов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2005, № 33. С. 14-19.*

5. *Интеллектуальное управление динамическими системами* / С. Н. Васильев, А. К. Жерлов, Е. А. Федосов, Б. Е. Федун. – М.: Физматлит, 2000. - 352 с.

6. *Нестеренко М. Ю. Влияние переотраженного сигнала на точность глобальных навигационных систем в области мониторинга деформаций земной поверхности на разрабатываемых месторождениях углеводородов* / М. Ю. Нестеренко, А. В. Цвяк, Ю. Р. Владов. *Успехи современного естествознания*, № 9, 2016. - С. 143-147.

7. *Основы управления технологическими процессами* / А. С. Анисимов [и др.]. Под ред. Н. С. Райбмана. – М.: Наука, 1978. - 440 с.

8. *Оценивание параметров и состояния* / П. Эйкхофф; Пер. с англ. В. А. Лотоцкого, А. С. Манделя; под ред. Н. С. Райбмана. – М.: Мир, 1975. - 683 с.

9. *Пащенко Ф. Ф. Введение в состоятельные методы моделирования систем. В 2-х ч. Ч. 2. Идентификация нелинейных систем.* – М.: Финансы и Статистика, 2007. – 288 с.

10. *Райбман Н. С. Построение моделей процессов производства* / Н. С. Райбман, В. М. Чадаев. – М.: Энергия, 1975. - 376 с.

11. *Рапопорт Э.Я. Анализ и синтез систем автоматического управления с распределенными параметрами.* - Москва : Высш. шк., 2005. - 291 с.

12. *Растринин Л. А. Современные принципы управления сложными объектами.* – М.: Сов. радио, 1980. – 232 с.

13. *Рей У. Методы управления технологическими процессами: Пер. с англ.* – М.: Мир, 1983. - 368 с.

14. *Патент RU 2575469, МПК G01V 9/00; G01V 1/28. Способ определения геодинамической активности недр разрабатываемого месторождения углеводородов* / М.Ю. Нестеренко, Ю.М. Нестеренко, Ю.Р. Владов, А.Ю. Владова (РФ). - № 2014145515/28; заявл. 12.11.2014; опубл.20.02.2016, Бюл. №5. – 14 с.

