

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

УДК 004.896: 681.5

МОНИТОРИНГ ТЕМПЕРАТУРНЫХ АНОМАЛИЙ В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛОМ ГРУНТЕ ЛИНЕЙНО-ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Ю.Р. Владов, А.Ю. Влагова

ФГБУН «Оренбургский научный центр УрО РАН»
Россия, 460000, г. Оренбург, ул. Пионерская, 11

Мониторинг состояния природно-техногенных объектов, в особенности расположенных на северных территориях страны, – актуальная научно-практическая проблема. В статье представлена методология мониторинга температурных аномалий в многолетнемерзлом грунте линейно-протяженных объектов, построенная на уникальных данных с послойным измерением температуры в каждой термоскважине выбранного участка. Определяют слой, которому принадлежит граница оттаивания грунта, затем находят взвешенные по слоям грунта температурные модели, соответствующую температурную модель проверяемого участка и температурные отклонения. Выясняют максимально допустимую величину температурного отклонения и сравнивают с ней найденные температурные отклонения. В случае невыполнения неравенства каждый раз формируют информацию, в которую включают местоположение выявленных температурных аномалий и соответствующие величины температурных отклонений. При использовании разработанной методологии эффективность функционирования линейно-протяженных объектов, расположенных в зоне многолетнемерзлого грунта, возрастает в среднем на 7,8...10,1 %.

Ключевые слова: мониторинг, температурные аномалии, многолетнемерзлый грунт, линейно-протяженные объекты.

Состояние исследований и актуальность проблемы

Под мониторингом состояния природно-техногенных объектов (ПТО) понимается система сбора, хранения и анализа относительно небольшого количества существенных признаков или параметров описания для вынесения суждения об их поведении или тенденции изменения в целом [1]. Отказы ПТО расходуют значительные материальные и экологические ресурсы, что выдвигает проблему технологий управления (в том числе мониторинга) их состоянием в ранг самых актуальных.

В ряде работ выделены типичные механизмы отказов, составлены физико-механические и математические модели процессов изменения состояния различ-

Юрий Рафаилович Владов (д.т.н., проф.), заведующий лабораторией.
Алла Юрьевна Влагова (д.т.н., доц.), ведущий научный сотрудник.

ных объектов на основе локальных параметров; в то же время методы локального описания не отражают реальной интенсивности изменения. Обширная диагностическая информация о состоянии 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 в условиях необходимости их ранжирования и сохранения связи с исследуемым ПТО. Среди наиболее значимых работ, посвященных широкому кругу вопросов идентификации и управления состоянием объектов, следует отметить работы отечественных и зарубежных авторов [2–4], а также работы в области сбора данных, моделирования и идентификации [5–7], управления технологическими процессами с сосредоточенными и распределенными параметрами [7]. Однако особенности ПТО не позволяют использовать 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 состоянием ПТО.

Поскольку исследование посвящено мониторингу температурных аномалий в многолетнемерзлом грунте (ММГ) линейно-протяженных объектов как типичном представителе класса ПТО, то целью является существенное повышение их эффективности функционирования, а также значительное повышение вероятности выявления опасных перемещений при оттаивании или замерзании грунта. Задачи исследования: выяснить актуальность проблемы; разработать функциональную схему процесса мониторинга; на примере реализации мониторинга подтвердить справедливость основных положений разработанной методологии; провести технико-экономическую оценку технического решения.

Патентный анализ

Актуальность проблемы подтверждена ростом числа патентов в данной области, полученных за последнее время. Из них отобраны технические решения с достаточным для принятия за аналоги потенциалом. Известен способ температурной стабилизации многолетнемерзлых грунтов, относящийся к основаниям, возводимым на многолетнемерзлых грунтах [8]. Он включает в себя размещение охлаждающих труб под отсыпку грунта, соединение их с конденсаторной частью и укладку слоя теплоизоляции. Охлаждающие трубы устанавливают внутри защитных труб через открытые торцы последних с возможностью извлечения и замены дефектных участков. Способ направлен на температурную стабилизацию многолетнемерзлых грунтов при строительстве оснований и сооружений, но с его помощью нельзя осуществить мониторинг температурных аномалий.

Известен способ дистанционного контроля состояния трубопровода в зоне вечной мерзлоты [9], по которому дистанционное зондирование трассы пролегания трубопровода осуществляют путем проведения радиолокационной интерферометрической съемки с повторяющихся орбит космических аппаратов, когда расстояние между траекториями полета космического аппарата составляет не более 500 м. При этом вначале для каждого из элементов радиолокационных изображений, полученных в разные моменты времени, определяют разность фаз сигналов, содержащую информацию о перемещениях отражающей поверхности и рельефе, затем исходя из модели рельефа и геометрии съемки вычисляют топографическую разность фаз, порождаемую рельефом, и по разности указанных фаз определяют динамическую разность фаз за время между съемками данной

пары. После чего вычисляют вертикальную составляющую перемещений отражающей поверхности за время между съемками трубопровода на поверхности земли, утяжеляющих конструкций вместе с трубопроводом или лежащего на трубопроводе грунта по предложенной зависимости, в которую входят: длина волны сигнала, угол падения радиоволны на снимаемую поверхность, вертикальная составляющая перемещения отражающей поверхности относительно поверхности земли за время между съемками. Увеличение интервала времени между наблюдениями в интерферометрических методах радиолокационной съемки при использовании схемы наблюдений с повторяющихся орбит приводит к возрастанию временной декорреляции отражений вплоть до полной потери сигнала. Кроме того, известный способ не позволяет проводить мониторинг температурных аномалий в ММГ.

Более близким является способ определения размеров и конфигурации зоны оттаивания вокруг скважины и температуры нефти в скважине, оборудованной эксплуатационной колонной и расположенной внутри нее колонной насосно-компрессорных труб, предназначенный для использования при основании и эксплуатации месторождений углеводородов, расположенных в зоне распространения многолетнемерзлых пород [10]. Способ включает проведение стандартных теплофизических исследований свойств грунта и определение на основании полученных исходных данных параметров теплообмена скважины и горных пород путем решения численными методами на основе математического моделирования, причем учитывают теплофизические параметры грунтов вокруг скважины, среднемесячную температуру воздуха, толщину снега, коэффициент теплообмена на поверхности земли с воздухом, дебит скважины, обводненность, глубину, температуру пласта на уровне отбора, радиус эксплуатационной колонны и колонны насосно-компрессорных труб, мощность мерзлоты, температуру мерзлоты, затем определяют динамику размера и конфигурации зоны оттаивания вокруг скважины и падение температуры нефти по стволу скважины, устьевую температуру на основе численных расчетов системы из трех сложных интегродифференциальных уравнений в цилиндрической системе координат. Способ направлен на повышение точности прогнозирования теплового состояния мерзлых пород при эксплуатации скважин, но определить температурные аномалии в многолетнемерзлом грунте трассы линейного объекта не представляется возможным, что является основным его недостатком.

Функциональная схема процесса мониторинга

Процесс мониторинга температурных аномалий в многолетнемерзлом грунте трассы линейного объекта отображен функциональной схемой (рис. 1), включающей в себя следующие основные операции:

1) послойно измеряют температуру грунта в каждой термоскважине выбранного участка, содержащего представительное количество термоскважин и расположенного вдоль трассы линейного объекта;

2) определяют по сигналам от датчиков температуры в каждой термоскважине слой, которому принадлежит граница оттаивания грунта;

3) определяют весовые коэффициенты a_i для каждого слоя грунта с учетом его влияния на формирование границы оттаивания грунта. Причем соблюдают обязательное условие нормировки для весовых коэффициентов взятых слоев грунта $\sum_{i=1}^k a_i = 1$;

4) находят взвешенную температурную модель для вышерасположенных

слоев грунта относительно границы оттаивания для каждой термоскважины выбранного участка по соотношению

$$Q_j = \sum_{i=1}^k a_i \cdot T_i, \quad (1)$$

где Q_j – взвешенная температурная модель для вышерасположенных слоев относительно границы оттаивания грунта j -той термоскважины;

$\sum_{i=1}^k$ – знак алгебраической суммы от найденного слоя, включающего границу оттаивания грунта ($i=1$) до поверхностного слоя k ;

a_i – весовой коэффициент для i -того слоя грунта, нормированная величина которого характеризует вклад соответствующего слоя во взвешенную температурную модель Q_j j -той термоскважины;

T_i – температура i -того слоя грунта в j -той термоскважине;

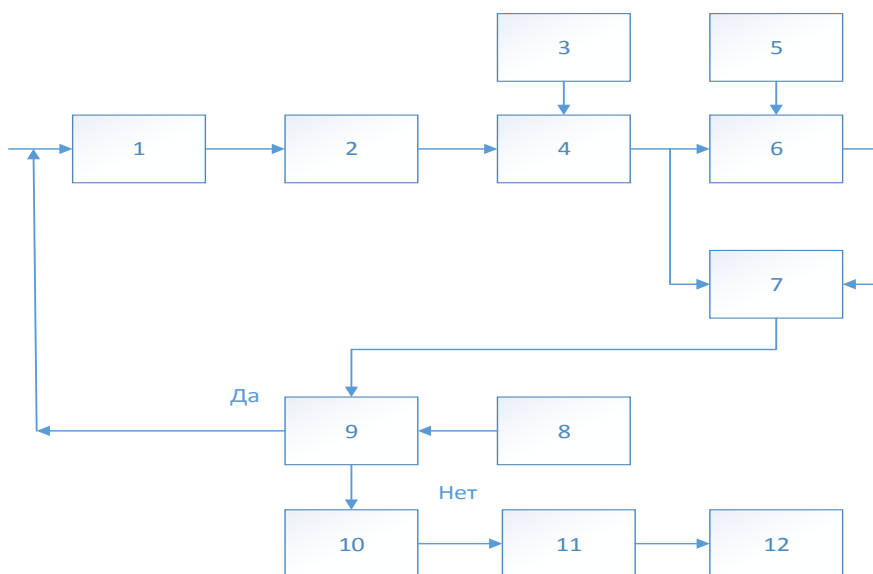


Рис. 1. Функциональная схема процесса мониторинга температурных аномалий в многолетнемерзлом грунте трассы протяженного объекта

5) определяют с учетом места расположения весовые коэффициенты b_j для термоскважин, вошедших в выбранный участок трассы линейного объекта, причем соблюдают обязательное условие нормировки для весовых коэффициентов термоскважин рассматриваемого участка $\sum_{j=1}^n b_j = 1$;

6) находят взвешенную температурную модель θ_{uh} для выбранного участка трассы линейного объекта по соотношению

$$Q_{uh} = \sum_{j=1}^n b_j \cdot Q_j, \quad (2)$$

где n – количество учитываемых термоскважин на выбранном участке;

b_j – весовой коэффициент для j -той термоскважины на выбранном участке трассы линейного объекта для учета вклада каждой термоскважины во взвешенную температурную модель участка;

7) находят отклонения d_j между взвешенными температурными моделями отдельных термоскважин Q_j и общей взвешенной температурной моделью

участка Q_{uh} по соотношению

$$d_j = Q_j - Q_{uh}; \quad (3)$$

8) в соответствии с априорными данными выясняют максимально допустимое отклонение d_{md} на выбранном участке трассы линейного объекта;

9) сравнивают d_j с d_{md} по соотношению

$$d_j \leq d_{md}; \quad (4)$$

в случае выполнения соотношения (4) для каждой термоскважины участка трассы линейного объекта информация поступает по выходу «Да» и ожидают поступления следующей порции температурных данных, а в случае невыполнения соотношения (4) информация поступает по выходу «Нет»;

10) формируют в последнем случае информацию, в которую включают местоположение выявленных температурных аномалий и соответствующие величины температурных отклонений;

11) выбирают следующий участок трассы линейного объекта;

12) переходят к мониторингу температурных аномалий в ММГ следующего участка.

Описание процесса мониторинга

Мониторинг температурных аномалий в многолетнемерзлом грунте линейно-протяженного объекта осуществляют следующим образом. Послойно измеряют (1) (см. рис. 1) температуру грунта в каждой термоскважине выбранного участка, расположенного вдоль трассы линейного объекта; по сигналам от датчиков температуры в каждой термоскважине определяют (2) слой, которому принадлежит граница оттаивания грунта; находят (3) весовые коэффициенты для каждого слоя грунта с учетом их влияния на формирование границы оттаивания грунта; находят (4) взвешенную температурную модель для вышерасположенных слоев грунта относительно границы оттаивания для каждой термоскважины выбранного участка по соотношению (1). Определяют (5) с учетом величин взвешенных моделей отдельных термоскважин, вошедших в выбранный участок трассы линейного объекта, их весовые коэффициенты β_j ; находят (6) взвешенную температурную модель выбранного участка θ_{uh} трассы линейного объекта по соотношению (2). Определяют (7) отклонения d_j между взвешенными температурными моделями Q_j отдельных термоскважин участка и взвешенной температурной моделью участка Q_{uh} по соотношению (3). В соответствии с эмпирическими данными выясняют (8) максимально допустимую величину отклонения d_{md} на выбранном участке трассы линейного объекта и сравнивают (9) d_j с d_{md} по соотношению (4). В случае выполнения соотношения (4) для каждой термоскважины выбранного участка, расположенного вдоль трассы линейного объекта, информацию пропускают по выходу «Да» и ожидают поступления следующей порции температурных данных, а в случае невыполнения соотношения (4) задействован выход «Нет», при этом каждый раз формируют (10) информацию, в которую включают местоположение выявленных температурных аномалий и соответствующие величины температурных отклонений, затем выбирают (11) следующий участок трассы линейного объекта и переходят (12) к мониторингу температурных аномалий грунта следующего участка.

Пример реализации мониторинга

В качестве примера реализации рассмотрим мониторинг температурных аномалий в ММГ участка надземной прокладки магистрального нефтепровода «Заполярье – Пурпе» с 11 термоскважинами и датой измерения 15.06.2016. На рис. 2 слои ММГ в метрах, в которых измеряется температура, отображены по оси X и составляют: 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0; 4,0; 6,0; 8,0; 10,0 и 11.

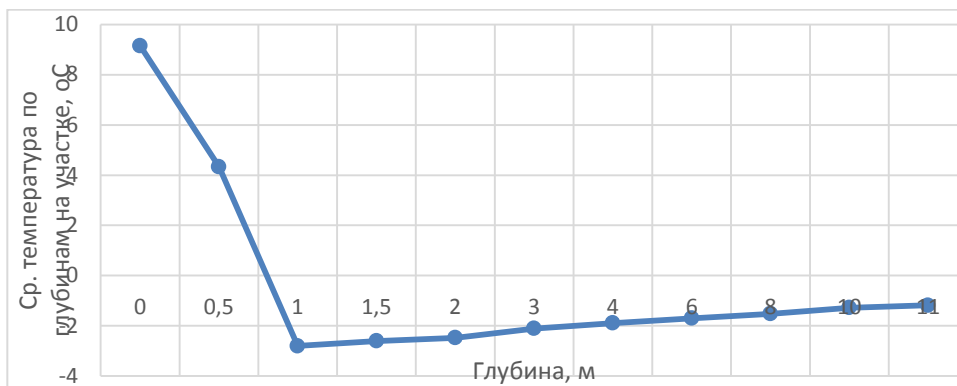


Рис. 2. График усредненных по слоям температур в многолетнемерзлом грунте для термоскважин выбранного участка трассы магистрального нефтепровода



Рис. 3. График с величинами взвешенных температурных моделей термоскважин на выбранном участке трассы магистрального нефтепровода

Послойно измеряют (1) температуру грунта в каждой термоскважине выбранного участка, расположенного вдоль трассы линейного объекта. Усредненные по слоям температуры ММГ для всех 11 термоскважин выбранного участка отображены на рис. 2. По сигналам от датчиков температуры в каждой термоскважине определяют (2) слой, которому принадлежит граница оттаивания ММ. Из рис. 2 видно, что граница оттаивания ММГ для всех ТС принадлежит слою в 1 м. Методом ранжирования находят (3) весовые коэффициенты a_i для каждого слоя грунта с учетом их влияния на формирование границы оттаивания грунта. Они составили: для слоя с границей оттаивания ММГ – 0,5, далее 0,33 и для поверхностного слоя 0,17. Проверка условия нормировки показывает, что сумма весовых коэффициентов равна 1.

Находят (4) взвешенную температурную модель Q_j для вышерасположенных слоев грунта относительно границы оттаивания для каждой термоскважины выбранного участка по соотношению (1). В этом соотношении для данного случая $k = 3; j = 1, 2, \dots, 11; i = 1, 2, \dots, 11$. На рис. 3 отображены величины взвешенных температурных моделей термоскважин выбранного участка трассы магистрального трубопровода.

Диапазон изменения взвешенных температурных моделей для термоскважин (ТС) выбранного участка составил от 0,14 для ТС735 до 2,91 для ТС433; определяют (5) с учетом величин взвешенных температурных моделей отдельных термоскважин, вошедших в выбранный участок линейного объекта, их весовые коэффициенты β_j . Диапазон изменения весовых коэффициентов b_j составил от 0,02 для ТС433 до 0,17 для ТС735. Проверяем выполнение условия нормировки: $\sum_{j=1}^{11} b_j = 1$; находят (6) взвешенную температурную модель выбранного участка Q_{uh} трассы линейного объекта по соотношению (2). Величина взвешенной температурной модели выбранного участка Q_{uh} трассы линейного объекта составила 1,17; находят (7) температурные отклонения d_j между взвешенными температурными моделями Q_j отдельных термоскважин участка и взвешенной температурной моделью участка Q_{uh} по соотношению (3). Диапазон изменения температурных отклонений d_j составил от -0,39 для ТС734 до 1,74 для ТС433; в соответствии с априорными данными выясняют (8) максимально допустимую величину отклонения d_{md} на выбранном участке трассы линейного объекта, которая составила 1,6; сравнивают (9) d_j с d_{md} по соотношению (4). Поскольку соотношение (4) в данном случае не выполняется для ТС433, то задействован выход «Нет», при этом формируют (10) информацию, в которую включают местоположение выявленных температурных аномалий и соответствующие величины температурных отклонений. Соответственно в сформированной информации будет указано местоположение температурной аномалии - ТС433, величина температурного отклонения – 1,74 и превышение выбранной максимально допустимой величины на 0,14. Если априорную максимально допустимую величину отклонения d_{md} на выбранном участке трассы линейного объекта выставили 1,9, то соотношение (4) выполняется для каждой термоскважины выбранного участка, расположенного вдоль трассы линейного объекта. Информация в этом случае проходит по выходу «Да» и ожидают поступления следующей порции температурных данных. Затем выбирают (11) следующий участок трассы линейного объекта и переходят (12) к его мониторингу.

Технико-экономическая оценка разработанного мониторинга температурных аномалий в ММГ линейно-протяженного объекта выполнена по известной методике [11], согласно которой эффективность функционирования $W(t)$ находится в виде аддитивной модели, представляющей сумму произведений коэффициентов весомости и соответствующих безразмерных частных характеристик эффективности. Из частных характеристик выделим три: надежность функционирования, стоимость эксплуатации и поставка продукта. Для каждой выделенной характеристики рассматриваем две модели: обычное функционирование и функционирование с учетом мониторинга температурных аномалий в ММГ трассы.

Вероятность нормального функционирования $P_f(t)$ – более полная характеристика надежности объекта длительного использования, учитывающая его начальное состояние, безотказность и восстанавливаемость. $P_f(t)$ найдем по формуле полной вероятности сложного события. Предполагая потоки отказов и вос-

становлений простейшими и пренебрегая членами высших порядков малости, получим

$$P_f(t) = P(0)P(t) + [1 - P(0)]V(\tau)P(t - \tau), \quad (5)$$

где $P(0)$ – вероятность исправного состояния объекта в начальный момент времени, характеризуемая коэффициентами готовности или использования;

$1 - P(0)$ – вероятность неисправного состояния объекта к начальному моменту времени его применения;

$P(t)$ – вероятность безотказной работы;

$P(t - \tau)$ – вероятность безотказной работы объекта за оставшееся время $(t - \tau)$, достаточное для его восстановления.

Выявлена закономерность: на этапе длительной эксплуатации линейного объекта, проложенного в зоне ММГ с возможным появлением температурных аномалий, надежность функционирования снижается, но с использованием результатов мониторинга по предложенному способу она снижается существенно меньше за счет своевременного и оперативного воздействия на участки с возникшими температурными аномалиями. Вторая модель надежности функционирования $P_{fs}(t)$ получается путем умножения (5) на выявленную функцию $f_1(U)$, учитывающую влияние своевременного, оперативного и более объективного воздействия на участки с возникшими температурными аномалиями.

Следующая частная характеристика – стоимость эксплуатации линейного объекта, проложенного в зоне ММГ. Находится как сумма основных расходов в течение года (6). Выразим ее в долях общей стоимости объекта:

$$C_e(t) = \frac{1}{C_0} [C_{kz}(t) + C_{rem}(t) \cdot f(t) + C_{zp}(t) + C_{pr}(t)] t, \quad (6)$$

где $C_{kz}(t)$ – годовые расходы на защиту от коррозии;

$C_{rem}(t)$ – годовая стоимость ремонта;

$C_{zp}(t)$ – зарплата обслуживающего персонала в течение года;

$C_{pr}(t)$ – прочие годовые расходы на эксплуатацию;

C_0 – проектная стоимость трубопровода, проложенного в зоне ММГ;

$f(t)$ – функция, учитывающая повышение расходов на ремонт в процессе длительной эксплуатации.

Установлено, что на этапе длительной эксплуатации с увеличением наработки стоимость эксплуатации повышается, но с использованием результатов мониторинга температурных аномалий в ММГ трассы она повышается существенно меньше за счет увеличения межремонтного цикла и уменьшения расходов на ремонт. Эта закономерность справедлива даже с учетом некоторого возрастания стоимости за счет расходов на формирование базы данных и разработки соответствующего программного комплекса. Поэтому вторая модель стоимости эксплуатации $C_{es}(t)$ линейного объекта, проложенного в зоне ММГ, получается путем умножения (6) на выявленную функцию $f_2(U)$, учитывающую увеличение межремонтного цикла и уменьшение расходов на ремонт за счет использования результатов мониторинга температурных аномалий в ММГ.

Третья по важности частная характеристика эффективности функционирования – суммарный объем поставки продукта за время функционирования объекта – определяется соотношением

$$R(t) = \frac{Q}{Q_{nom} T_{norm}} t, \quad (7)$$

где Q и Q_{nom} – фактическая и номинальная объемные производительности ($\text{м}^3/\text{с}$), определяемые из соотношений:

$$Q = PFV;$$

$$Q_{nom} = P_{nom} F_{nom} V_{nom}.$$

В соотношениях:

P, P_{nom} – рабочее и номинальное давление, МПа;

F, F_{nom} – фактическая и номинальная площадь сечения, м^2 ;

V, V_{nom} – фактическая и номинальная скорость транспортировки продукта, м/ч;

T_{norm} – нормированный срок службы объекта.

Вторая модель объема поставки продукта $R_s(t)$ получается путем умножения (7) на выявленную функцию $f_3(U)$, учитывающую повышенные возможности соблюдения эксплуатационных режимов и сохранения проектных параметров, а также уменьшение времени простоя в ремонтный период и сокращение продолжительности ремонтов.

С учетом найденных значений частных характеристик по двум моделям – надежности функционирования, стоимости эксплуатации и поставки продукта – оценим эффективность функционирования $W(t)$ участка трубопровода, проложенного в зоне ММГ, также по двум соотношениям:

$$W(t) = a_1 P_f(t) - a_2 C_e(t) + a_3 R(t); \quad (8)$$

$$W_s(t) = a_1 P_{fs}(t) - a_2 C_{es}(t) + a_3 R_s(t), \quad (9)$$

где a_1, a_2 и a_3 – коэффициенты влияния частных характеристик на эффективность функционирования участка трубопровода, проложенного в зоне ММГ, значения которых определены экспертной оценкой, проведенной среди соответствующих специалистов. Результаты расчета эффективности функционирования трубопровода для двух вариантов приведены на рис. 4.

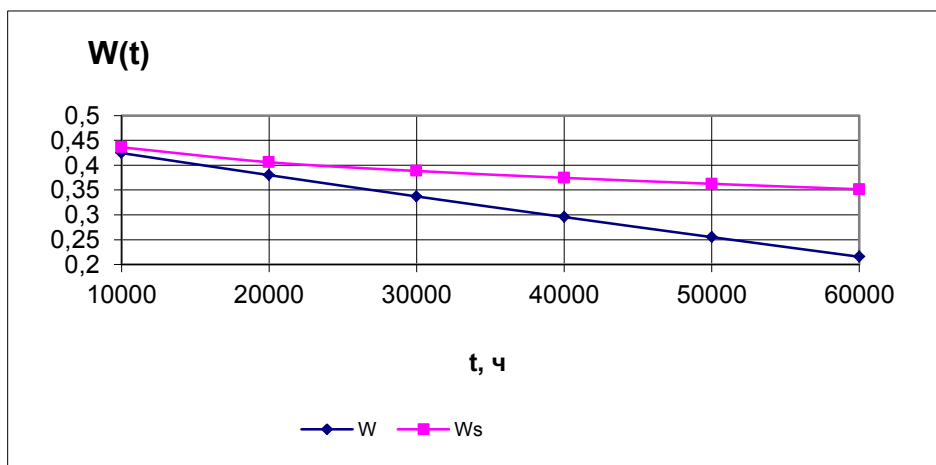


Рис. 4. Изменение эффективности функционирования выбранного участка трассы магистрального нефтепровода без (W) и с мониторингом температурных аномалий (W_s)

Выводы

Анализ опубликованных сведений по мониторингу состояния природно-техногенных объектов, сбору данных, моделированию и идентификации, управ-

лению технологическими процессами с сосредоточенными и распределенными параметрами, Data Mining, Big Data, а также проведенный патентно-технический анализ позволяют констатировать значительную актуальность проблемы.

Процесс мониторинга температурных аномалий в многолетнемерзлом грунте трассы линейно-протяженных объектов отображен функциональной схемой, включающей в себя 12 основных операций, выполнение которых, как это показано в примере реализации, позволяет выявить температурные аномалии в ММГ с высокой эффективностью, а также существенно повысить вероятность выявления опасных перемещений грунта при его оттаивании или замерзании.

Результаты технико-экономического обоснования свидетельствуют, что вероятность нормального функционирования участка трубопровода в исследуемом интервале времени монотонно убывает, поставка продукта растет, а относительная стоимость эксплуатации участка трубопровода увеличивается. Проведение мониторинга температурных аномалий в ММГ линейно-протяженного объекта повышает надежность функционирования трубопровода в среднем на 5,6 %, стоимость эксплуатации уменьшается на 4,2 %, поставка продукта возрастает на 7,4 %, а эффективность функционирования возрастает в среднем на 7,8...10,1 %.

Данное исследование является важной составляющей разработанного авторами современного научного направления «Технологии интеллектуального управления состоянием техногенных объектов» [12], поддержанного в 2012–2013 гг. грантами Российского фонда фундаментальных исследований, а впоследствии обобщенного на природные компоненты с апробацией методологии на мониторинге геодинамической активности недр разрабатываемых месторождений углеводородов [13–14].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Владов Ю.Р., Нестеренко М.Ю., Влацкий В.В. Мониторинг состояния природно-техногенных объектов с замкнутой автоматизированной системой // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2016. – № 4 (52). – С. 22–31.
2. Васильев С.Н., Жерлов А.К., Федосов Е.А., Федунев Б.Е. Интеллектуальное управление динамическими системами. – М.: Физматлит, 2000. – 352 с.
3. Эйххофф П. Оценивание параметров и состояния / Пер. с англ. В.А. Лотоцкого, А.С. Манделя; под ред. Н. С. Райбмана. – М.: Мир, 1975. – 683 с.
4. Райбман Н.С., Чадеев В.М. Построение моделей процессов производства. – М.: Энергия, 1975. – 376 с.
5. Рапопорт Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами. – М.: Высш. шк., 2003. – 299 с.
6. Растргин Л.А. Современные принципы управления сложными объектами. – М.: Сов. радио, 1980. – 232 с.
7. Рей У. Методы управления технологическими процессами: Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 368 с.
8. Патент RU 2157872, МПК7 E02D 3/115. Конструкция насыпного охлаждаемого основания сооружений и способ температурной стабилизации многолетнемерзлых грунтов / А.И. Безрезняков, Н.В. Михайлов, А.П. Попов и др. (РФ). – № 96124547/03; заявл. 26.12.1996; опубл. 20.10.2000, Бюл. № 29/2008. – 5 с.
9. Патент RU 2260742, МПК7 F17D 5/02. Способ дистанционного контроля состояния трубопровода в зоне вечной мерзлоты / А.И. Захаров, Н.Н. Хренов (РФ). – № 2004107291/06; заявл. 12.03.2004; опубл. 20.09.2005, Бюл. № 26. – 6 с.
10. Патент RU 2588076, МПК7 E21B 47/06. Способ определения температуры многолетнемерзлых пород вокруг скважины и температуры флюида в скважине / Д.В. Шевелева (РФ). – № 2004147792/03; заявл. 26.11.2014; опубл. 27.06.2016, Бюл. № 18. – 12 с.

11. Владов Ю.Р. Аналитическая идентификация технического состояния и эффективность функционирования промышленных объектов // Автоматизация в промышленности. – 2005. – № 4. – С. 9–12.
12. Владов Ю.Р., Владова А.Ю. Построение и моделирование систем интеллектуального управления состоянием техногенных объектов: монография. – Оренбург: ИПК «Университет», 2013. – 243 с.
13. Нестеренко М.Ю., Цвяк А.В., Владов Ю.Р. Влияние переотраженного сигнала на точность глобальных навигационных систем в области мониторинга деформаций земной поверхности на разрабатываемых месторождениях углеводородов // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 9. – С. 143–147.
14. Патент RU 2575469, МПК G01V 9/00; G01V 1/28 (2006.01). 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.

Статья поступила в редакцию 30 июня 2017 г.

MONITORING OF TEMPERATURE ANOMALIES IN A MULTI-NITROGEN GROUND OF EXPANSION OBJECTS

Yu.R. Vladov, A.Yu. Vladova

FGBUN «Orenburg Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences»
11, Pionerskaya St., 460000, Orenburg, Russian Federation

Monitoring of the state of natural and man-made objects located in the northern territories of the country is an actual scientific and practical problem. The article presents a methodology for monitoring temperature anomalies in permafrost soils of extended objects. It is built on unique data obtained by layer-by-layer measurement of temperature in each well of the selected site. Determine the layer to which the boundary of thawing of the soil belongs. Then, the temperature models of the wells, the area under test and the corresponding temperature deviations are weighted along the soil layers. Find out the maximum permissible value of the temperature deviation and compare with it the found temperature deviations. In the case of non-fulfillment of the inequality, information is formed each time, which includes the location of the detected temperature anomalies and the corresponding values of the temperature deviations. The efficiency of functioning of long objects located in the permafrost zone increases on average by 7.8 ... 10.1%.

Keywords: *monitoring, temperature anomalies, permafrost, linear-extended objects.*

*Yury R. Vladov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Alla Yu. Vladova (Dr. Sci. (Techn.)), Associate Professor.*

УДК 004.9:681.3.06

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

В.Н. Яшин

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: vlyashin@yandex.ru.

Рассмотрены вопросы оценки эффективности автоматизированных информационных систем с учетом их структуры и специфики протекающих в них информационных процессов. Для определения технико-эксплуатационной, технологической и экономической эффективности автоматизированных информационных систем предложены универсальные показатели. Применение предложенных универсальных показателей эффективности позволит ускорить процесс обоснования выбора структуры и характеристик автоматизированных информационных систем. Одним из таких показателей предлагается использовать косвенный интегральный показатель эффективности, который учитывает как локальные, так и общие показатели эффективности и в равной мере отображает временные и количественные факторы.

Ключевые слова: эффективность, оценка, информационный процесс, автоматизированная информационная система, качество, структура, показатели.

Обоснование выбора структуры и характеристик автоматизированных информационных систем (АИС) была и остается актуальной задачей в области разработки информационных систем (ИС). Успешное решение этой сложной задачи невозможно в отрыве от оценки эффективности АИС. Известно, что под эффективностью понимается свойство системы выполнять поставленную цель в заданных условиях использования и с определенным качеством. При этом качество ИС представляет совокупность свойств системы, обуславливающих возможность ее использования для удовлетворения определенных в соответствии с ее назначением потребностей. Количественные же характеристики этих свойств определяются соответствующими показателями. В зависимости от видов эффективности ИС – технической, социальной, экономической [1, 2, 3] – различают локальные и общие показатели. К локальным показателям эффективности ИС относят технико-эксплуатационные, технологические, прагматические и т. д.; к общим показателям – показатели экономической эффективности ИС. Таким образом, эффективность ИС является сложной интегральной характеристикой, зависящей от различных локальных и общих показателей, которые должны быть соответствующим образом количественно оценены.

Вопросам оценки эффективности ИС посвящено достаточно большое количество работ. Из них наибольший практический интерес представляют работы [4–10], в которых основное внимание уделяется не столько количественной оценке показателей эффективности, сколько разработке общей методологии оценки эффективности ИС. Кроме того, в этих работах весьма скупо освещены

вопросы, связанные с оценкой эффективности АИС. Следует также отметить, что авторы указанных работ не претендуют на универсальность предложенных ими методов, понимая важность специфических условий, в которых протекает информационная деятельность в различных областях промышленности, и связанные с этим трудности оценки эффективности ИС.

Обзор методов оценки эффективности ИС показал, что их существует достаточно много и среди них можно выделить следующие:

- затратные методы. Оценка производится не на основе измерения конечного продукта или результата, а на основе затраченных ресурсов или сил;

- методы оценки прямого результата. Оценивается прямой измеримый результат, например снижение стоимости владения, повышение функциональности системы, снижение трудозатрат или появление побочного продукта основного производства;

- методы, основанные на оценке идеальности процесса. Эти методы базируются на статических или динамических сравнительных алгоритмах. Базовым показателем выбирается объект рассматриваемой системы, тогда идеальной считается информационная система с лучшими для отрасли показателями затрат на единицу выхода. Популярны также подходы на базе сравнения с альтернативным решением;

- квалиметрические методы. Такие методы комплексно рассматривают ИС, организуют ее измерение и обрабатывают полученные результаты статистическими, социологическими и/или экспертными методами.

Анализ данных методов показал, что все они обладают как преимуществами, так и недостатками. К достоинствам указанных методов можно отнести их возможность оценивать эффективность в специфических условиях функционирования ИС, к недостаткам – отсутствие универсальности и слабую практическую адаптацию к оценке эффективности АИС.

Сложность задачи усугубляется еще и тем, что невозможно в большинстве случаев осуществить непосредственную оценку эффективности ИС исходя из результатов, достигнутых предприятиями или научными подразделениями на базе использования поступившей к ним информации. Это объясняется тем, что информация является необходимой предпосылкой решений, принимаемых во всех фазах производственной и научно-исследовательской деятельности, и найти эффект от каждой условной единицы информации в суммарном производственном или научном результате – практически неосуществимая задача. Поэтому для оценки эффективности ИС приходится вводить косвенные показатели исходя из априорного предположения о том, что вся информация, поставляемая ИС, обладает безусловной ценностью для объекта управления или получателей информации.

Необходимо также подчеркнуть, что универсальных показателей эффективности, позволяющих в достаточной степени отобразить специфику конкретной области, которую эти системы обслуживают, не существует. Поэтому необходимо сформировать показатели, которые, с одной стороны, характеризовали бы сущность информационных процессов в системе, а с другой стороны, учитывали существующие организационные формы информационной деятельности. Поэтому прежде чем говорить о выборе косвенных показателей для оценки эффективности АИС, рассмотрим сущность информационных процессов, протекающих в них, и соответствующие им структуры АИС. Существует достаточно много понятий, связанных с информационными процессами, ИС и АИС, поэтому уточ-

ним эти понятия с точки зрения понимания их автором данной статьи.

В общем случае под информационным процессом будем понимать последовательность действий, выполняемых с информацией, а под ИС – систему, в которой этот информационный процесс реализуется. Если при осуществлении информационного процесса в ИС используются информационные (компьютерные) технологии, то такие ИС будем называть АИС.

Рассмотрим более подробно действия, выполняемые с информацией в АИС. К таким действиям можно отнести отбор (восприятие) информации, преобразование информации, передачу информации, обработку информации, хранение и поиск информации. Охарактеризуем кратко каждое из этих действий для представления обобщенной структуры АИС.

Отбор информации связан с целенаправленным извлечением и анализом информации об объекте, процессе или явлении. Отбор информации выполняет несколько функций, среди которых можно выделить две важных: оценка информации на значимость и сжатие информации. При оценке информации на значимость происходит ее селекция, или информационная фильтрация, результатом которой является отделение полезной информации от информационных шумов (помех). Сжатие информации необходимо для ее представления в компактном виде, позволяющем более эффективно использовать каналы, по которым передается информация и средства ее хранения.

Преобразование информации включает в себя операции, связанные с нормализацией (приведением к определенным нормам), аналого-цифровым преобразованием, кодированием и т. д. Результатом преобразования информации является материальный носитель (сигнал), представленный в форме, удобной для передачи, обработки и хранения.

Передача информации является важной составляющей информационного процесса, в результате которого происходит транспортировка информации от источника информации к приемнику. Передача осуществляется в среде распространения по соответствующим каналам, имеющим различную физическую природу: электромагнитную, электрическую, оптическую и т. д.

Обработка информации также является важной составляющей информационного процесса. Она связана с изменением информации по определенным законам и неформальным правилам. Среди законов можно выделить законы математики, физики, биологии и т. д.; среди неформальных правил – опыт, интуицию, «здравый смысл» и т. д. Результатом обработки является тоже информация, которая может быть представлена в иных формах (например, упорядоченная по каким-то признакам или содержащая ответы на поставленные вопросы). В случае, если процесс обработки подлежит формализации, он может осуществляться техническими средствами.

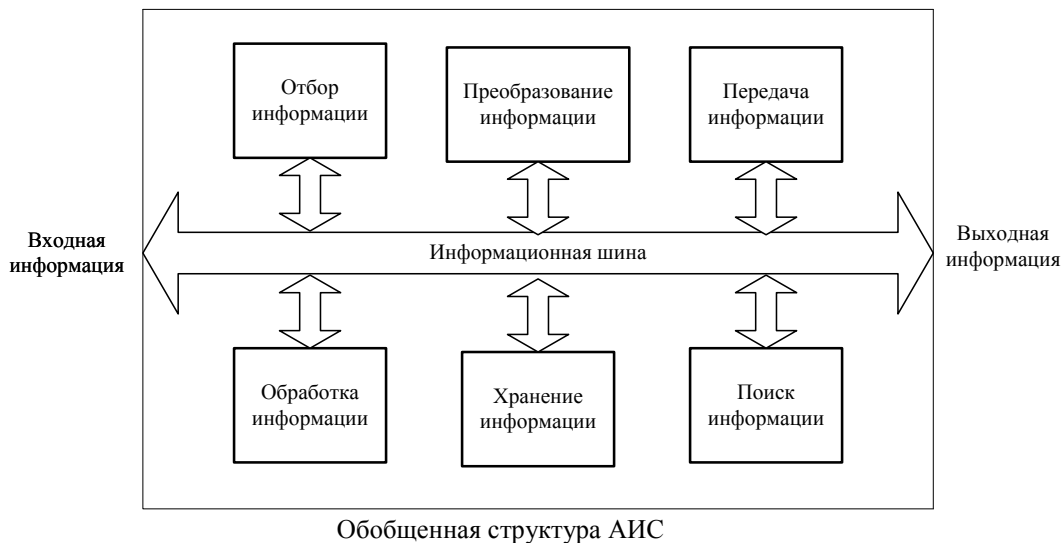
Хранение информации связано с ее записью на некоторый материальный носитель с целью дальнейшего поиска, извлечения и использования. В качестве таких носителей могут использоваться бумага, магнитная лента, накопители на жестких магнитных дисках, накопители на оптических и магнитооптических дисках и т. д.

Поиск информации связан с целенаправленным извлечением необходимой информации. Хранение и поиск информации в АИС реализуется с помощью баз данных (БД).

Подводя итог сказанному об информационных процессах, необходимо отметить, что это не простая последовательность действий, выполняемых с информа-

цией, а сложная их взаимосвязь, взаимопроникновение и развитие. В каждом из действий (составляющих информационного процесса) можно найти признаки других составляющих: в отборе – преобразование, в хранении – передачу, в передаче – обработку и т. д.

Реализуются информационные процессы в системах, называемых ИС или АИС. На рисунке приведена обобщенная структура АИС.



Данная структура АИС является открытой, поскольку в зависимости от конкретной задачи будет изменяться ее конфигурация и состав. Таким образом, эффективность АИС будет зависеть от различных факторов, в том числе и от ее конкретной структуры.

Можно также утверждать, что почти всегда течение информационных процессов в АИС определяется двумя взаимно противоречивыми тенденциями. Это, во-первых, стремление представить потребителю наиболее полную информацию, что, естественно, удлиняет продолжительность информационного процесса, и, во-вторых, стремление представить эту информацию в наиболее короткие сроки, что зачастую ведет к уменьшению объема информации. Недостаточно полный объем или запаздывание в общем случае имеют один и тот же результат – обесценивание информации.

Автор данной статьи предлагает для оценки эффективности АИС косвенный интегральный показатель эффективности A , который бы учитывал как локальные, так и общие показатели эффективности и в равной мере отображал бы временные и количественные факторы:

$$A = \sum_{i=1}^N \frac{V_i}{T_i} = \frac{V_1}{T_1} + \frac{V_2}{T_2} + \frac{V_3}{T_3} + \dots + \frac{V_N}{T_N}, \quad (1)$$

где V_i – суммарный объем информации, подготовленный i -м блоком АИС за определенный период времени и представленный в каких-либо универсальных единицах измерения информации; T_i – интервал времени, характеризующий длительность подготовки i -м блоком АИС суммарного объема информации; N – число блоков АИС, задействованных в реализуемом в АИС информационном процессе.

Например, если для реализации информационного процесса задействованы

все блоки структуры АИС, представленной на рисунке, то $N = 6$.

Для того чтобы формула (1) имела практический смысл, необходимо определить значения V_i и T_i с учетом особенностей информационного процесса, протекающего в АИС, и ее структуры.

Суммарный объем информации V_i , подготовленный i -м блоком АИС за определенный период времени, определим следующим образом:

$$V_i = \sum_{j=1}^m \theta_j + \sum_{k=1}^{\xi} \delta_k, \quad (2)$$

где θ_j – объем информации, поступившей на i -й блок АИС от j -го источника информации;

m – число источников информации;

δ_k – объем выданной информации i -м блоком АИС на информационную шину, удовлетворяющей критерию k ;

ξ – общее число критериев k .

Объем выданной информации i -м блоком АИС на информационную шину, удовлетворяющей критерию k , может носить случайный характер, поскольку часть поступившей информации может не удовлетворять отдельному критерию k .

Величина интервала времени T_i в формуле (1) также складывается из двух компонентов, которые соответствуют первому и второму слагаемым в правой части формулы (2):

$$T_i = \sum_{k=1}^{\xi} t_k - \sum_{j=1}^m \tau_j, \quad (3)$$

где t_k – момент времени, соответствующий выдаче подготовленной информации (удовлетворяющей критерию k) i -м блоком на информационную шину АИС;

τ_j – момент времени, соответствующий поступлению информации на i -й блок АИС от j -го источника информации.

Подставляя выражения (2) и (3) в формулу (1) и учитывая то, что

$$A = \sum_{i=1}^N A_i = \sum_{i=1}^N \frac{V_i}{T_i}, \quad (4)$$

получим выражение для показателя эффективности АИС в развернутом виде:

$$A = \sum_{i=1}^N \frac{\left(\sum_{j=1}^m \theta_j + \sum_{k=1}^{\xi} \delta_k \right)_i}{\left(\sum_{k=1}^{\xi} t_k - \sum_{j=1}^m \tau_j \right)_i}. \quad (5)$$

Расчет A в соответствии с формулой (5) должен производиться с учетом следующих ограничений:

$$T_i = \left(\sum_{k=1}^{\xi} t_k - \sum_{j=1}^m \tau_j \right) \leq T_{0i}, \quad (6)$$

который задает верхний предел длительности интервала времени T_{0i} , характери-

зующего длительность подготовки i -м блоком АИС суммарного объема информации.

Полученный интегральный показатель эффективности может быть использован в качестве универсального показателя для оценки технико-эксплуатационных, технологических, прагматических, экономических и других качеств АИС. Интегральный показатель эффективности A является функциональной характеристикой, которую можно повышать, совершенствуя техническую базу АИС и используя труд квалифицированных сотрудников. Однако это приводит в конечном итоге к увеличению материальных затрат и ограничивающим фактором в этом случае является их величина. Поэтому без экономической характеристики невозможно корректно поставить задачу оптимизации АИС. Желательно, чтобы такой экономический показатель эффективности АИС был достаточно универсален и позволял сравнивать между собой различные по структуре и технической оснащенности АИС. В качестве такого показателя можно использовать показатель экономической эффективности φ , определяемый на основе следующего соотношения:

$$\varphi = \frac{W}{A}, \quad (7)$$

где W – материальные затраты на приобретение и эксплуатацию АИС.

Материальные затраты W складываются из первоначальных затрат C , идущих главным образом на приобретение технических средств АИС, и эксплуатационных расходов W_E . Поскольку стоимость технических средств распределяется на все время их использования в АИС, то для интервала времени, для которого определяется интегральный показатель эффективности АИС, необходимо учитывать амортизационные отчисления S :

$$S = \frac{C}{T_C}, \quad (8)$$

где T_C – период амортизации.

С учетом выражения (8) материальные затраты W в единицу времени могут быть записаны в следующем виде:

$$W = S + W_E, \quad (9)$$

где W_E – эксплуатационные расходы в единицу времени.

Подставляя соотношение (9) в формулу (7), получим окончательное выражение для показателя экономической эффективности φ в виде

$$\varphi = \frac{S + W'_E}{A}. \quad (10)$$

Очевидно, что при вложении в АИС дополнительных ресурсов и направлении их на улучшение средств автоматизации (например, на приобретение компьютеров и других технических средств) увеличивается технико-эксплуатационная и технологическая эффективность АИС. Однако одновременно будут возрастать и материальные затраты на АИС. С учетом этого задача оптимизации АИС может быть сформулирована следующим образом – обеспечить максимальное значение показателя A при заданном ограничении показателя φ :

$$A \rightarrow A_{\max}, \quad \varphi \leq \varphi_{\lim}.$$

Таким образом, применяемый подход к оценке эффективности АИС позволяет использовать предложенные в статье универсальные количественные показатели для быстрой оценки ее эффективности. Эти показатели могут найти применение при обосновании выбора структуры и характеристик АИС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Экономика информационных систем: Учеб. пособие / А.Л. Рыжко, Н.М. Лобанова, Н.А. Рыжко, Е.О. Кучинская. – М.: Финансовый университет, 2014. – 204 с.
2. *Затеса А.В.* Выбор информационной системы на предприятии: проблемы и способы их преодоления // Креативная экономика. – 2010. – № 11 (47). – С. 64–71.
3. *Кудряшова М.Г.* Классификация эффектов от использования информационных систем // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. – 2013. – № 12 (60). – С. 34.
4. *Калиберда Е.А.* Анализ эффективности информационных систем: Учеб. пособие. – Омск: Омский государственный институт сервиса, 2006. – 109 с.
5. *Костров А.В., Матвеев Д.А.* Информационный менеджмент. Оценка эффективности информационных систем: Учеб. пособие. – Владимир: ВлГУ, 2004. – 116 с.
6. *Калачанов В.Д., Кобко Л.И.* Экономическая эффективность внедрения информационных технологий. – М.: Изд-во МАИ, 2006. – С. 26–35.
7. *Калачанов В.Д., Жидаев С.С., Рыжко Н.А.* Управление производством в машиностроении с использованием процессно-ориентированных информационных систем // Экономика и управление в машиностроении. – М.: Технология машиностроения, 2011. – № 1 (13) – С. 12–26.
8. *Галкин Г.* Методы определения экономического эффекта от ИТ-проекта. Ч. 2. Качественные и вероятностные методы [Электронный ресурс] // Intelligent enterprise. – 2005. – № 24 (133). – Режим доступа: <http://www.iemag.ru/master-class/detail.php?ID=15721>
9. *Макфарлэйн Г.* ИТ-служба в зеркале сбалансированных показателей [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://balanced-scorecard.ru/taxonomy/term/11>
10. *Федосеев А.* Коэффициент автоматизации [Электронный ресурс] // Корпоративный менеджмент: сайт. – Режим доступа: <http://www.cfin.ru/itm/kis/intalev-7.shtml>

Статья поступила в редакцию 7 апреля 2017 г.

EVALUATION OF EFFICIENCY OF AUTOMATED INFORMATION SYSTEMS

V.N. Yashin

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

This paper describes problems of estimation of automated information systems efficiency depending of their structure and specificity of current information processes in them. Universal indicators are proposed as indicators for determining technical, operational, technological and economic efficiency of automated information systems. Application of the proposed universal performance indicators may speed up the process of choosing of the automated information systems structure and characteristics. It is proposed to use the indirect integral index of automated information systems efficiency as one of such indicators because it takes into account local and common performance indicators and equally it would display factors of time and quantity.

Keywords: *efficiency, evaluation, information process, automated information system, quality, structure, indicators.*