

А.В. Рудакова, О.В. Поливода

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПОДСИСТЕМ МОНИТОРИНГА
РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ
МЕТОДАМИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА**

Аннотация. Предложен метод оптимизации параметров функционирования подсистемы мониторинга территориально распределенной системы на основе применения методов одномерного и двумерного спектрального анализа. Данный метод позволяет избежать информационной избыточности и упростить техническую реализацию контура идентификации состояния распределенного объекта, эффективность работы которого обуславливает эффективность работы информационно-управляющей системы.

Ключевые слова: территориально распределенная система, подсистема мониторинга, спектральный анализ, корреляционная функция, оптимизация схемы размещения датчиков.

Постановка проблемы

Современные производственные комплексы представляют собой сложные территориально-распределенные объекты, для управления которыми используются интегрированные автоматизированные системы управления (ИАСУ) [1]. Функционирование информационно управляющих систем существенно зависит от слаженности и эффективности работы всех его подсистем, в особенности подсистемы мониторинга. Повышение эффективности функционирования подсистем мониторинга в значительной мере связано с совершенствованием методов и средств сбора и анализа данных.

Оптимизация подсистем мониторинга распределенных объектов заключается в определении оптимальной схемы размещения датчиков, их необходимого и достаточного количества, периодичности их опроса с целью уменьшения информационной избыточности измерений и, как следствие, уменьшения объема информации, предназначенной для хранения и обработки, снижения требований к вычислительным средствам и телекоммуникационным каналам связи.

Анализ публикаций по теме исследования

Оперативное управление на протяжении всего срока функционирования объекта, состоит из следующих периодически повторяющихся этапов: оценка текущего состояния объекта управления; определение отклонения движения объекта от заданной траектории; решение задачи нахождения оптимального управления (формирование управляющих воздействий) на предстоящий период; реализация управления (корректировка состояния системы – возвращение ее на заданную траекторию) [2].

В связи с наличием неопределенностей относительно состояния объекта, обусловленных стохастическим изменением внешних и внутренних условий функционирования системы, основной задачей подсистемы мониторинга является своевременная идентификация состояния объекта, на основе которой в ИАСУ формируется управление.

Расчет оптимального управления как правило осуществляется в АРМ диспетчера, с помощью системы поддержки принятия решений (СППР) [2], структура которой приведена на рис.1.

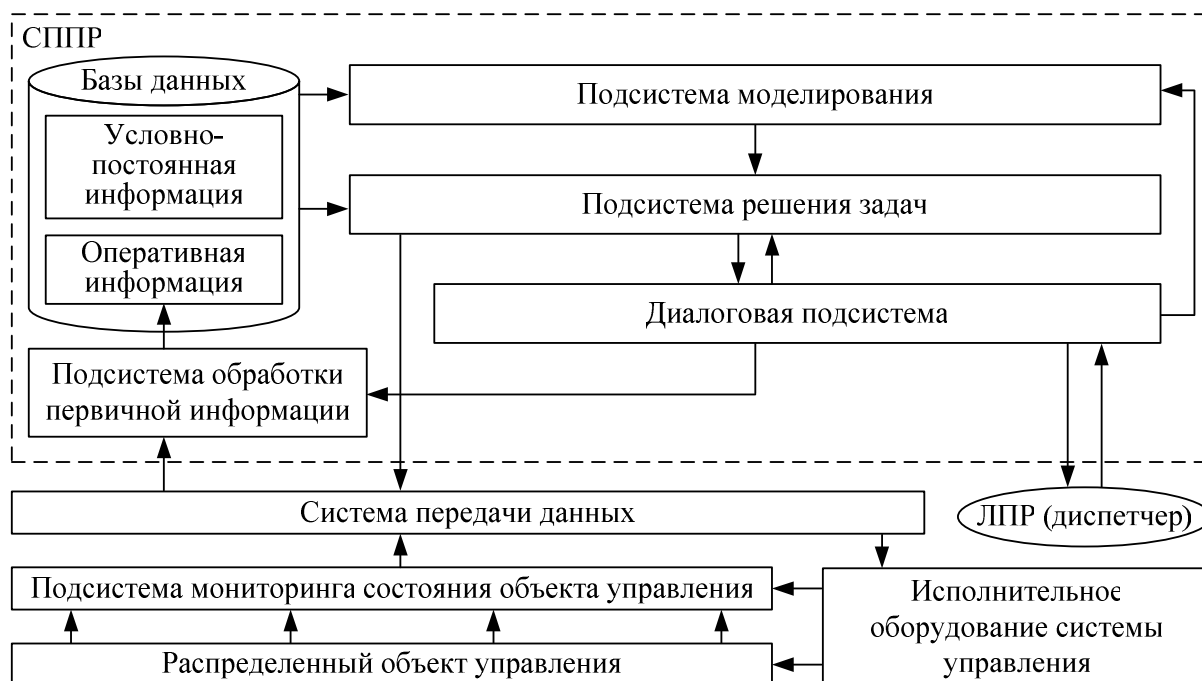


Рисунок 1 – Структура СППР
для управления распределенным объектом

В интегрированной автоматизированной системе управления распределенным объектом необходимо наличие соответствующих моделей и программ для прогноза динамики состояния и планирования распределения ресурсов, системы мониторинга для оценки качества управления, участие управляющего персонала в процессе согласования принятых решений.

Подсистема мониторинга должна осуществлять систематическое измерение всех текущих параметров функционирования объекта, параметров окружающей среды, пополнение баз данных новой информацией и фиксировать изменения параметров системы для возможности дальнейшего прогноза. Таким образом, целью функционирования подсистемы мониторинга является обеспечение СППР оперативной информацией о состоянии объекта, а также информацией о режиме работы исполнительного оборудования.

Подсистема обработки первичной информации выполняет анализ внешней входной информации, обработку информации, получаемой от оператора, отображение данных в виде удобном для последующей обработки и передачу информации в базу данных.

Подсистема моделирования формирует модель динамики состояния распределенного объекта на основе условно-постоянной и оперативной информации из базы данных. Для упрощения анализа распределенного объекта можно использовать непрерывную модель в виде поверхности с использованием аппроксимирующих оболочек, которая дает возможность прогнозировать состояние в любой точке территориально-распределенной системы [3].

В подсистеме решения задач формируются режимы работы оборудования на предстоящий период с учетом прогноза динамики состояния объекта [4].

Система передачи данных, связывающая СППР с оборудованием системы и подсистемой мониторинга, может быть реализована на базе беспроводных телекоммуникационных технологий.

Для повышения эффективности функционирования территориально распределенной системы необходимым условием является эффективная работа подсистемы мониторинга. В первую очередь необходимо избегать информационной избыточности измерений и упростить техническую реализацию контура идентификации состояния распределенного объекта.

Постановка задачи

Для достижения поставленной цели необходимо разработать метод оптимизации параметров функционирования подсистемы мониторинга территориально распределенного объекта, который позволит определить схему размещения датчиков и периодичность их опроса, на основе применения методов одномерного и двумерного спектрального анализа.

Основная часть

На основе известной динамической модели функционирования территориально распределенного объекта $Z(x, y, t)$, построенной в виде аппроксимирующей оболочки [3], в каждой произвольной точке $(x, y) \in \Omega$ можно определить корреляционную функцию, которая характеризует скорость протекания процессов в системе, по формуле

$$r_Z(x, y, \tau) = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{\overset{\circ}{Z}(x, y, t) \cdot \overset{\circ}{Z}(x, y, t + \tau)}{D_Z(x, y)} dt, \quad (1)$$

где $\overset{\circ}{Z}(x, y, t) = Z(x, y, t) - m_Z(x, y)$ – центрированное значение контролируемого параметра в точке с координатами (x, y) ;

$m_Z(x, y) = \frac{1}{T} \int_0^T Z(x, y, t) dt$ – математическое ожидание;

$$D_Z(x, y) = \frac{1}{T} \int_0^T [Z(x, y, t) - m_Z(x, y)]^2 dt$$
 – дисперсия значений параметра; $Z(x, y, t)$ – конкретная реализация случайного процесса, которая может быть получена на основе статистической информации о функционировании объекта за продолжительный интервал времени T .

Для упрощения практических расчетов корреляции (1) можно воспользоваться дискретизированными формулами для нахождения автокорреляционной функции в виде [5]

$$r_Z(x, y, \tau) = \frac{1}{N - m} \sum_{i=0}^{N-m-1} \frac{\overset{\circ}{Z}(x, y, t_i) \cdot \overset{\circ}{Z}(x, y, t_i + m\Delta t_\partial)}{D_Z(x, y)}, \quad (2)$$

где $\Delta t_\partial = T / N$ – временной интервал между соседними отмеренными значениями параметров; N – количество расчетных точек (достаточно большое); $\tau = m\Delta t_\partial$ – корреляционный интервал $m = 0, 1, \dots, N$.

Для определения математического ожидания и дисперсии можно использовать следующие выражения

$$m_Z(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} Z(x, y, t_i), \quad D_Z(x, y) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} \left[Z(x, y, t_i) \right]^2. \quad (3)$$

Спектральный анализ позволяет оценить максимальные частоты спектра случайного процесса, на основе которых можно определить шаг дискретизации согласно теореме Котельникова как [5]

$$\Delta t \leq \frac{\pi}{\omega_c}, \quad (4)$$

где ω_c – максимальная частота спектра ограниченного сигнала в точке с заданными координатами (x, y) , для нахождения которой традиционно используют равенство Парсеваля

$$\frac{1}{\pi} \int_0^{\omega_c} [S(\omega)]^2 d\omega = \frac{\eta}{\pi} \int_0^{\infty} [S(\omega)]^2 d\omega, \quad (5)$$

где η – коэффициент, характеризующий точность воспроизведения, $\eta = 0,95$; $S(\omega)$ – спектральная плотность амплитуд случайного процесса, которая может быть найдена с помощью преобразования Фурье корреляционной функции

$$S_Z(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} r_Z(\tau) \cos \omega \tau d\tau. \quad (6)$$

Периоды опроса датчиков по всей территории распределенного объекта Ω можно определить как функцию в зависимости от координат

$$\Delta t(x, y) \leq \frac{\pi}{\omega_c(x, y)}, \quad (7)$$

или, что рациональнее из удобства практической реализации подсистемы мониторинга, как

$$\Delta t = \min_{(x, y) \in \Omega} \Delta t(x, y). \quad (8)$$

Моделирование проводилось для подсистемы мониторинга влажности почвы сельскохозяйственных угодий. Динамика изменения влажности в отдельных точках территории при различных режимах функционирования поливных систем, типах грунта и выращиваемых культур с учетом осадков на протяжении всего вегетационного периода, полученная на основе модели изложенной в [6], приведена на рис. 2.

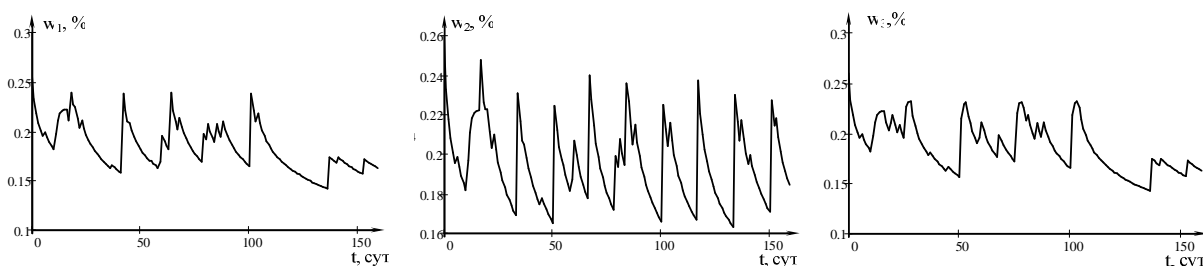


Рисунок 2 – Результаты моделирования влажности почвы

Автокорреляционные зависимости для приведенных процессов, рассчитанные согласно (2) и (3) показаны на рис. 3.

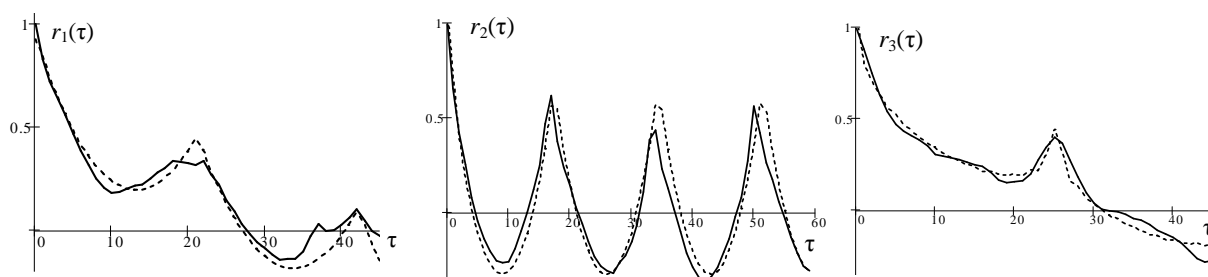


Рисунок 3 – Корреляционные зависимости:

(---- – расчетные значения; --- – аппроксимированные значения)

Для нахождения спектральной плотности процессов изменения влажности $S(\omega)$ корреляционные зависимости должны быть представлены в аналитической форме, которые можно получить из графиков с помощью метода наименьших квадратов [7]. В результате аппроксимации получены следующие зависимости:

$$\begin{aligned}
 r_1(\tau) &= -0,18 \cdot \sum_{n=1}^{10} (-1)^{n+1} \frac{\cos(n \cdot (0,37\tau - 9,5))}{n^2} + 0,65 - \left(\frac{\tau}{52}\right)^{0,8}, \\
 r_2(\tau) &= -0,4 \cdot \sum_{n=1}^{10} (-1)^{n+1} \frac{\cos(n \cdot (0,37\tau - 9,6))}{n^2} + 0,5e^{-\tau}, \\
 r_3(\tau) &= -0,11 \cdot \sum_{n=1}^{10} (-1)^{n+1} \frac{\cos(n \cdot (0,245\tau - 9,3))}{n} + 0,8 - \left(\frac{\tau}{48}\right)^{0,6}.
 \end{aligned} \tag{9}$$

В результате подстановки аналитических корреляционных зависимостей (9) в уравнения (5) и (6) были получены частоты срезов $\omega_{c1} = 0,324 \text{ сут}^{-1}$, $\omega_{c2} = 0,738 \text{ сут}^{-1}$, $\omega_{c3} = 0,475 \text{ сут}^{-1}$, и оценки шагов дискретизации согласно (7) $\Delta t_1 \leq 9,7 \text{ сут}$, $\Delta t_2 \leq 4,25 \text{ сут}$, $\Delta t_3 \leq 6,6 \text{ сут}$. В качестве периода опроса датчиков можно выбрать минимальное значение $\Delta t \leq 4,25 \text{ сут}$ для всех точек (x, y) территориально распределенной ирригационной системы.

Двумерный спектральный анализ поверхностной модели территориально распределенного объекта дает возможность определить схему расположения датчиков подсистемы мониторинга на плоскости $(x, y) \in \Omega$.

Степень зависимости значений распределенного параметра $Z(x, y, t)$ в направлении различных координат для любого фиксированного момента времени $t \in (0, T)$ можно оценить с помощью двумерной автокорреляционной функции вида

$$r(\tau_x, \tau_y) = \frac{1}{(N_1 - m_1)(N_2 - m_2)} \sum_{i=0}^{N_1 - m_1 - 1} \sum_{j=0}^{N_2 - m_2 - 1} \frac{Z^0(x_i, y_j) Z^0(x_i + \tau_x, y_j + \tau_y)}{D_Z}, \quad (10)$$

где N_1 и N_2 – количество отсчетов по координатам x и y ;

$\tau_x = m_1 \Delta x$, $\tau_y = m_2 \Delta y$ – интервалы отстояния точек процесса;

$Z^0(x_i, y_j) = Z(x_i, y_j) - m_Z$ – центрированные значения процесса $Z(x, y)$;

$m_Z = \frac{1}{N_1 \cdot N_2} \sum_{i=0}^{N_1 - 1} \sum_{j=0}^{N_2 - 1} Z(x_i, y_j)$ и $D_Z = \frac{1}{N_1 \cdot N_2 - 1} \sum_{i=0}^{N_1 - 1} \sum_{j=0}^{N_2 - 1} [Z^0(x_i, y_j)]^2$ – ма-

тематическое ожидание и дисперсия случайного процесса $Z(x, y)$.

При анализе двумерного спектра можно оценить максимальные частоты спектра распределенного случайного процесса, на основе которого можно определить шаг дискретизации по координатам x и y согласно теореме Котельникова:

$$\Delta \bar{x}_i \leq \frac{\pi}{\omega_{cx_i}}, \quad \Delta \bar{y}_j \leq \frac{\pi}{\omega_{cy_j}}, \quad i = \overline{0, N_2 - 1}, \quad j = \overline{0, N_1 - 1}, \quad (11)$$

где ω_{cx_i} и ω_{cy_j} – максимальные частоты спектра для каждого сечения корреляционной функции по координатам x и y соответственно.

Пересчет к реальным координатам можно осуществить с учетом масштабирующего коэффициента k , зависящего от вида и радиуса действия исполнительного оборудования как $\Delta x = k \cdot \Delta \bar{x}$, $\Delta y = k \cdot \Delta \bar{y}$.

Расчеты максимальных частот спектра ω_{cx_i} и ω_{cy_j} проводятся как и для одномерного случая по соотношению Парсеваля (5), где спектральные плотности амплитуд случайного процесса определяется при помощи преобразования Фурье по корреляционной функции (6).

Шаг расстановки датчиков по всей территории распределенного объекта принимается как

$$\Delta x = \min(\Delta x_i) \text{ и } \Delta y = \min(\Delta y_j). \quad (12)$$

Моделирование предложенного метода определения оптимальной схемы расстановки датчиков проводилось в границах территории отдельного хозяйства. Вид поверхностной модели влажности почвы в относительных координатах в момент времени $t = 20$ суток от начала вегетационного периода представлен на рис. 4а. График рассчитанной корреляционной функции $r_Z(\tau_x, \tau_y)$ показан на рис. 4б.

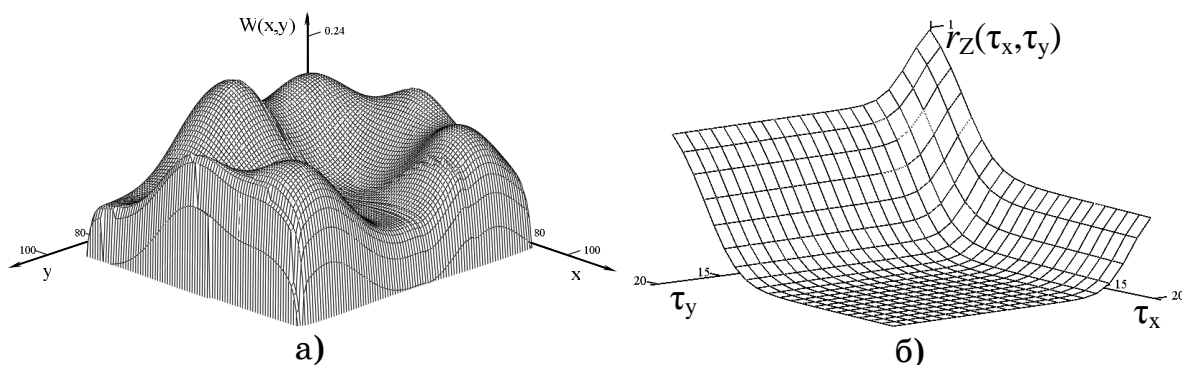
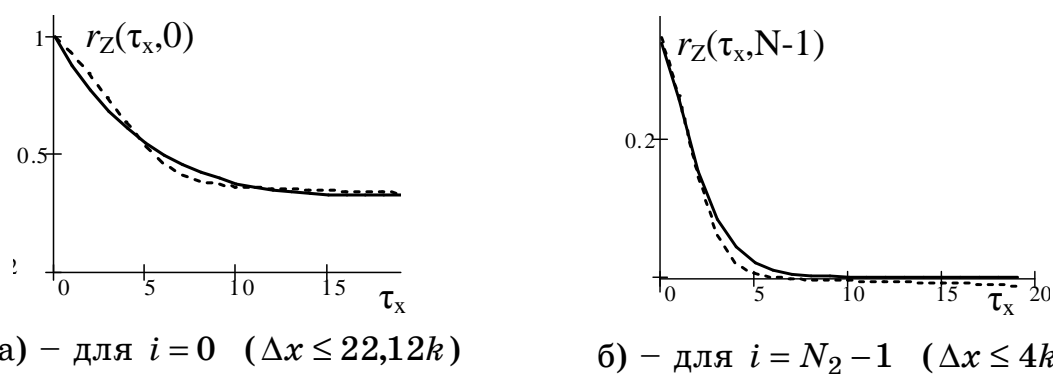


Рисунок 4 – Модели характерных параметров:

а) – влагосодержания почвы; б) – корреляционной функции

Аппроксимация сечений корреляционной функции по двум осям осуществлялась методом наименьших квадратов. Некоторые полученные зависимости приведены на рис. 5, рис. 6.



а) – для $i = 0$ ($\Delta x \leq 22,12k$)

б) – для $i = N_2 - 1$ ($\Delta x \leq 4k$)

Рисунок 5 – Аппроксимация сечений корреляционной функции по оси x

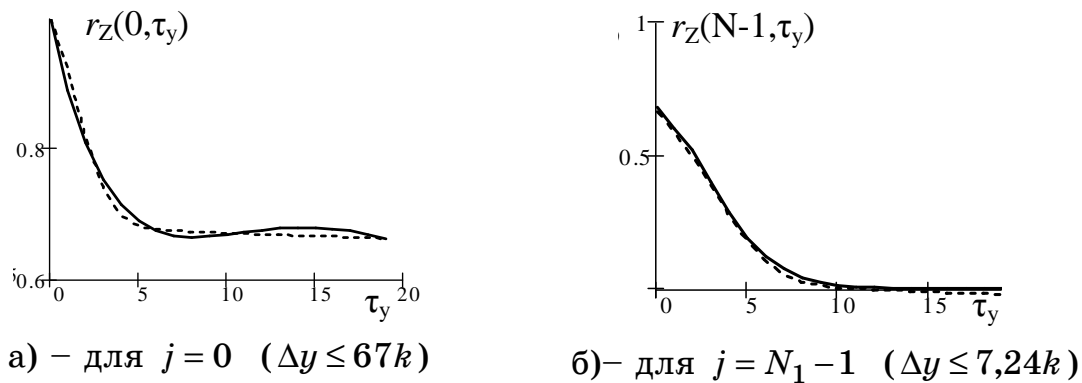


Рисунок 6 – Аппроксимация сечений корреляционной функции по оси y

Аналитические выражения для граничных (предельных) сечений корреляционных функций по двум осям получены в виде

$$r_Z(x, 0) = e^{-0,068x} \cdot (1 - 0,066x + 0,004x^2), \quad (13)$$

$$r_Z(x, N - 1) = e^{-0,875x} \cdot (0,338 + 0,273x + 0,0006x^2),$$

$$r_Z(0, y) = e^{-0,1y} \cdot (1 - 0,027y + 0,011y^2), \quad (14)$$

$$r_Z(N - 1, y) = e^{-0,76y} \cdot (0,681 + 0,37y + 0,23y^2).$$

На основе полученных аналитических зависимостей (13), (14) были определены максимальный и минимальный шаг по оси x и по оси y соответственно. При определении шага расположения датчиков влажности из соотношений (12) получилось, что $\Delta x \leq 4k$, а $\Delta y \leq 7,24k$.

Выводы

Применение динамической поверхностной модели позволяет оптимизировать схему размещения датчиков по территориально-распределенному объекту. Разработанная методика определения схемы оптимального размещения датчиков и периодичности их опроса на основе методов одномерного и двумерного спектрального анализа позволяет избежать информационной избыточности и упростить техническую реализацию контура идентификации состояния распределенного объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рудакова А.В. Информационно-управляющая система для систем водораспределения / А.В. Рудакова, С.П. Шейник, О.В. Поливода // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2009. – №1(34). – С. 333–337.
2. Поливода О.В. Оптимизация управления влагообеспечением в ирригационных системах/ О.В. Поливода, А.В. Рудакова, С.П. Шейник // Международная научно-практическая конференция «Технические науки: современные проблемы и перспективы развития», 10 декабря 2012 г.: [материалы] / Приволжский научно-исследовательский центр. – Йошкар-Ола: Коллоквиум, 2013. – С. 120 – 123.
3. Поливода О.В. Использование непрерывных оболочек для моделирования влагосодержания почвы/ О.В. Поливода, С.П. Шейник, А.В. Рудакова // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2009. – №2(35). – С. 357–362.
4. Поливода О.В. Методы оперативного управления влагообеспечением в ирригационных системах с прогнозирующей моделью / О.В. Поливода, А.В. Рудакова // SAIT 2013: XV міжнародна науково-технічна конференція, Київ, 27-31 травня 2013 р.: тези доповідей. – К.: ННК «ІПСА» НТУУ «КПІ», 2013. – С.165.
5. Дмитриев В.И. Прикладная теория информации. – М.: Высшая школа, 1989. – 320 с.
6. Поливода О.В. Динамическая модель распределения влаги в пахотном слое/О.В. Поливода, Н.И. Рыженко, А.В. Рудакова // Вестник Херсонского национального технического университета.– 2010. – №3(39).– С. 374 – 380.
7. Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ. Множественная регрессия / Н. Дрейпер, Г. Смит– 3-е изд.– М.:«Диалектика», 2007.– 912 с.