

**МЕТОДЫ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ
ВЛАГООБЕСПЕЧЕНИЕМ В ИРРИГАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ
С ПРОГНОЗИРУЮЩЕЙ МОДЕЛЬЮ**

О.В. ПОЛИВОДА, А.В. РУДАКОВА

Разработаны методы оптимизации оперативного управления влагообеспечением в ирригационной системе в условиях неопределенности за счет использования адаптивной системы управления с прогнозирующей моделью, которая решает текущие задачи диспетчерского управления: наблюдение, формирование прогноза состояния влажности почвы, поиск и реализацию оптимального управления с распределением по интервалам времени. Использование непрерывной модели территориально распределенного объекта позволяет прогнозировать динамику влажности почвы в корнеобитаемом слое по всей площади орошаемой территории с учетом ее гидрологических характеристик, вида культивируемых растений, уровня грунтовых вод, объемов воды, поступающих на поля от поливных систем, либо в виде случайных осадков. Применение разработанных методов в интегрированных автоматизированных системах управления влагообеспечением обуславливает гарантированную поддержку оптимальных условий выращивания культур, а также экономное использование водных и энергетических ресурсов.

ВВЕДЕНИЕ

Оросительные системы представляют собой сложные территориально-распределенные объекты, цель функционирования которых заключается в своевременном подведении к орошаемой территории поливных вод, необходимых для обеспечения оптимальной влажности почвы при выращивании различных сельскохозяйственных культур [1]. Повышение эффективности функционирования таких систем в значительной мере связано с совершенствованием методов и средств планирования графиков полива и оперативно-диспетчерского управления влагообеспечением.

Современные системы управления влагообеспечением представляют собой интегрированные автоматизированные системы (ИАС), которые с помощью подсистемы мониторинга осуществляют систематическое измерение всех текущих параметров функционирования объекта и параметров окружающей среды, пополнение баз данных новой информацией и оценку состояния системы с возможностью прогнозирования поведения системы [2]. Эффективная работа подсистемы мониторинга является необходимым условием для повышения эффективности функционирования ирригационной

системы. В первую очередь необходимо избегать информационной избыточности измерений, что обеспечивается за счет оптимального размещения датчиков. Периодичность опроса датчиков и схему их размещения можно определить на основе методов одномерного и двумерного спектрального анализа динамики влажности по всей орошаемой территории [3]. Следующей задачей является своевременная идентификация состояния влажности почвы, на основе которой в ИАС формируется управление.

Оперативное управление режимами влагообеспечения сельхозугодий, которое осуществляется на протяжении всего вегетационного периода, состоит из следующих периодически повторяющихся этапов: составление планов работы оборудования ирригационной системы на текущий период на основе графиков полива; реализация планов влагообеспечения и их корректировка; мониторинг, оценка и прогноз влажности почвы; формирование графиков полива на предстоящий расчетный период на основе заявок от потребителей [4].

Расчет оптимального управления влагообеспечением может осуществляться в АРМ диспетчера, с помощью системы поддержки принятия решений (СППР) [5], структура которой приведена на рис. 1.

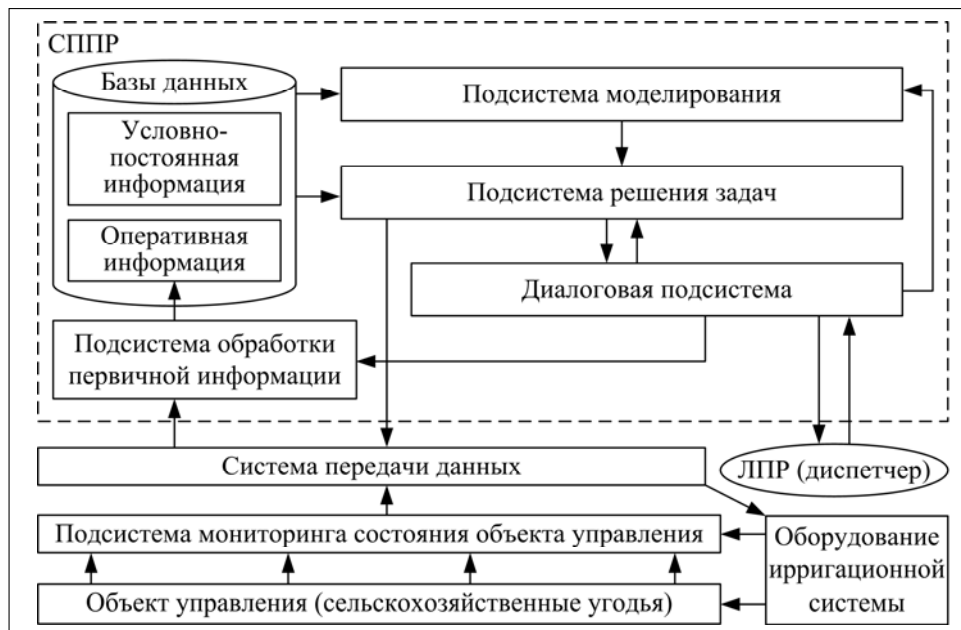


Рис. 1. Структура СППР для управления влагообеспечением

Ирригационная система как объект управления, которая функционирует с целью поддержания достаточного уровня влагообеспечения прикорневого слоя почвы, характеризуется наличием неопределенностей относительно состава почв, объема случайных осадков, колебаний метеорологических условий, способа распределения оросительных вод и водопотребления выращиваемых культур. Применение соответствующих моделей для прогноза динамики влажности почвы позволяет оптимизировать процесс управления ирригационной системой.

Цель работы — разработка методов оптимизации оперативного управления влагообеспечением в условиях неопределенности за счет использования адаптивной системы управления с прогнозирующей моделью.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для достижения поставленной цели необходимо сформировать динамическую модель распределения влаги в пахотном слое, позволяющую прогнозировать влажность почвы в корнеобитаемом слое; разработать структуру и алгоритм работы системы оперативного управления с прогнозом в пределах отдельной оросительной системы; провести анализ временных интервалов работы отдельных компонентов системы оперативного управления влагообеспечением.

МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ

Для моделирования динамики влажности в пахотном слое принято использовать уравнение Дарси, описывающее процессы фильтрации влаги в почве [4]. Применение метода конечных разностей позволяет получить дискретизированную модель динамики распределения влаги в пахотном слое, пригодную для анализа влажности почвы на любой интересующей глубине [6]:

$$\begin{cases} \frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{f}(\vec{x}) + \vec{b}(\vec{x})\vec{u} + \vec{q}, \\ \vec{y} = \mathbf{C}\vec{x}, \end{cases} \quad (1)$$

где $\vec{x} = (x_0, x_1, \dots, x_k, \dots, x_N)^T$ — вектор состояния (значения влажности почвы по глубине); $\vec{f}(\vec{x})$ и $\vec{b}(\vec{x})$ — набор непрерывных функций, зависящих от элементов вектора состояния и формирующихся на основе гидрофизических характеристик почвы; $\vec{q} = (q_0 \quad -TR(x_1) \quad \dots \quad -TR(x_{N-1}) \quad q_N)^T$ — вектор внешних воздействий, включающий осадки q_0 , водопотребление культур по слоям $TR(x_i)$, $i = \overline{1, N-1}$, а также сток в подпахотный слой q_N ; \mathbf{C} — матрица, формирующаяся согласно структуре системы измерения влажности; \vec{u} — вектор управления, сформированный с учетом типа поливной системы; \vec{y} — вектор выхода, представляющий доступные для измерения значения влажности почвы.

Прогнозирующая модель (1) предназначена для оценки возможной влажности почвы, а также формирования управления оборудованием ирригационной системы на предстоящий период при фиксированном режиме работы поливного оборудования с учетом текущей влажности почвы и прогноза метеорологических условий.

СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Предлагаемая структура системы оперативного управления с прогнозирующей моделью приведена на рис. 2. Объект управления (ОУ) наблюдается посредством измерительной системы (ИС). Блок оценивания (БО) формирует оценку текущего состояния объекта $\hat{\vec{x}}_i$. Модель долгосрочного прогноза (МДП) формирует вектор состояния \vec{x}_{i+1} на горизонт прогноза, т.е. для момента времени $t_i + \tau$. Для прогноза вектора состояния \vec{x}_{i+1} используется

условно-постоянная информация (массив данных \vec{R}), которая хранится в базе данных (БД), о типе почвы пахотного и подпахотного слоев, почвенно-гидрологических константах слоев, о типе культивируемых культур и условиях их выращивания, о наличии единиц оросительной техники, их расположении на географической плоскости (координаты оборудования), а также статистическая информация о климатических условиях.

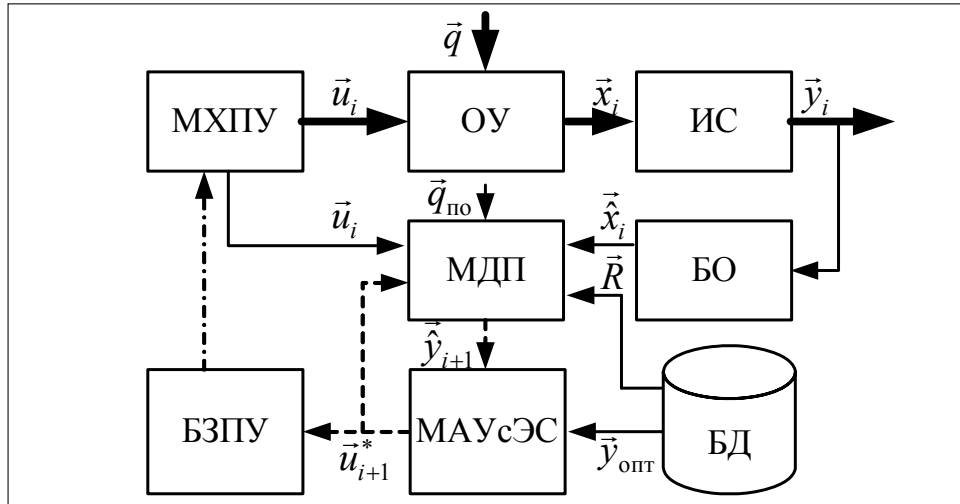


Рис. 2. Структура системы оперативного управления с прогнозом: 1 — $\rightarrow t \in (t_i, t_{i+1})$; 2 — $\rightarrow t \in (t_i, t_i + \tau_1)$; 3 — $\dashrightarrow t \in (t_i + \tau_1, t_i + \tau_1 + \tau_2)$; 4 — $\dashrightarrow t = t_i + \tau$

Модуль адаптивного управления с экспоненциальным сглаживанием (МАУсЭС) и краткосрочным прогнозом [7] формирует вектор управления \vec{u}_{i+1}^* (график полива) на горизонт управления для интервала времени $t \in (t_i + \tau, t_i + 2\tau)$ с учетом заданного коридора влажности $\vec{y}_{\text{опт}} - \Delta y_{\text{д}} \leq \vec{y}_i \leq \vec{y}_{\text{опт}} + \Delta y_{\text{д}}$. Найденное оптимальное управление записывается в блок запоминания программ управления (БЗПУ) и передается в модуль хранения программ управления (МХПУ) к моменту времени $t_{i+1} = t_i + \tau$ для реализации на интервале времени $t \in (t_i + \tau, t_i + 2\tau)$. На следующем $i+1$ интервале управления формирование графика полива повторяется с учетом скорректированной оценки прогноза состояния влажности почвы \vec{y}_{i+1} с сохранением длины интервала прогноза τ .

Продолжительность интервала достоверного прогноза для формирования графика полива, в течение которого систему можно считать квазилинейной, как и периодичность опроса датчиков, определяется с помощью одномерного спектрального анализа динамики влажности почвы в конкретных климатических и агротехнических условиях [3].

ВРЕМЕННЫЕ ИНТЕРВАЛЫ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

При практической реализации системы оперативного управления с прогнозом в течение всего периода вегетации повторяются циклы длительностью τ , в процессе которых измерение и управление осуществляется в режиме

реального времени, а формирование векторов оценки состояния \vec{y}_{i+1} и оптимального управления \vec{u}_{i+1}^* — в режиме ускоренного времени.

Временные интервалы работы различных компонент системы оперативного управления в i -м цикле приведены на рис. 3.

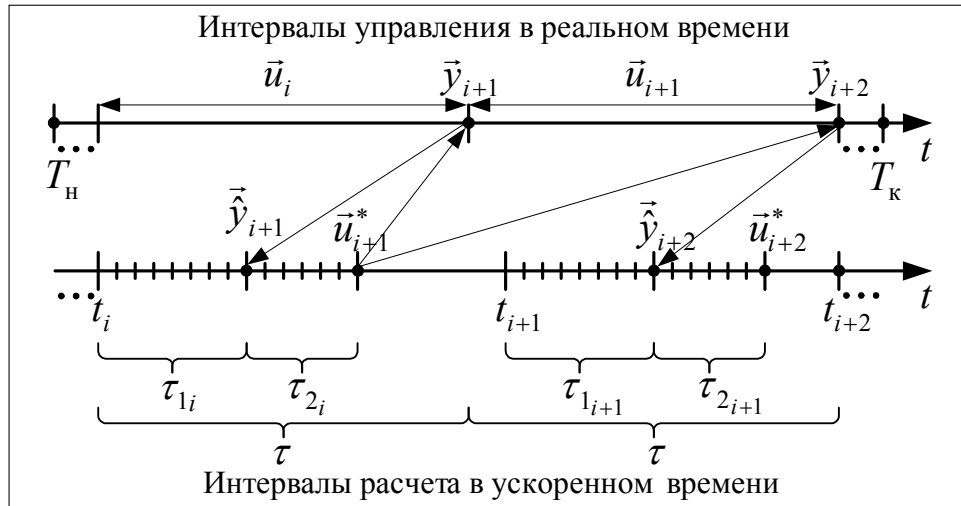


Рис. 3. Временные интервалы работы системы оперативного управления

При $t \in (t_i, t_{i+1})$ для всех $i = 0, \dots, N$ осуществляется измерение и непосредственно управление объектом на протяжении всего вегетационного периода $t \in (T_H, T_K)$. Блоки на рис. 2 соединены толстыми сплошными линиями (1) и задействованы постоянно.

Интервал τ_1 — промежуток времени, в течении которого формируется прогноз состояния влажности почвы \vec{y}_{i+1} . При этом в системе оперативного управления, приведенной на рис. 2, задействованы блоки, соединенные тонкими сплошными линиями (2).

Интервал τ_2 — промежуток времени, в течение которого осуществляется поиск оптимального управления \vec{u}_{i+1}^* на следующий период времени $t \in (t_{i+1}, t_{i+2})$. При этом задействованы блоки, соединенные пунктирными линиями (3) (рис. 2).

Момент времени $t = t_i + \tau$ — предельный момент передачи найденного графика оптимального полива на предстоящий интервал времени из БЗПУ в МХПУ (задействованы блоки, соединенные пунктирными линиями (4)) для своевременной реализации управления оборудованием ирригационной системы на следующем цикле оперативного управления.

АЛГОРИТМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Периодический расчет оптимального управления влагообеспечением в пределах отдельной оросительной системы должен осуществляться в АРМ диспетчера для каждой единицы поливной техники. В этом случае при формировании оценки вектора состояния \vec{y}_{i+1} на горизонт прогноза результат

опроса датчиков влажности $y_{ik}^{(p)}$ в зоне действия p -й единицы поливной техники усредняют. Блок-схема алгоритма работы системы оперативного управления с прогнозом, обеспечивающей эффективное водораспределение по всей орошаемой площади приведена на рис. 4.

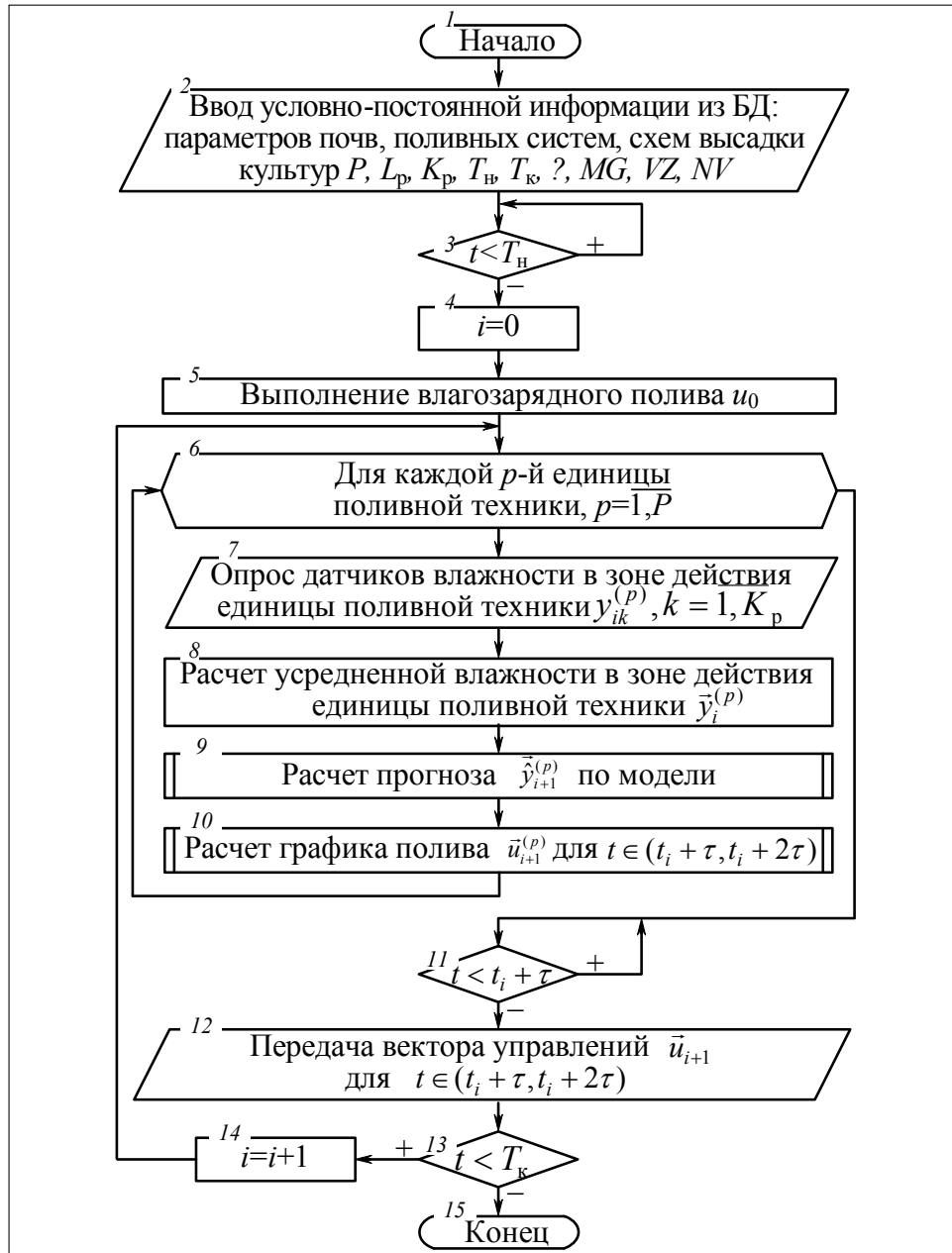


Рис. 4. Блок-схема алгоритма оперативного управления влагообеспечением

При моделировании алгоритма оперативного управления с прогнозом оказалось, что при $\tau = 3$ суток и $P = 8$ для фрагмента ирригационной системы продолжительность формирования прогноза и управления составила менее часа.

Параметры функционирования системы управления, состояния оборудования и распределенного объекта, которые необходимы для оперативного управления с применением современных программно-аппаратных средств, целесообразно визуализировать в виде интерфейсных окон SCADA-системы.

Усовершенствование систем водораспределения путем использования предлагаемых методов оперативного управления с прогнозирующей моделью должно сопровождаться внедрением современных подсистем мониторинга, которые обеспечивают постоянный контроль климатических параметров, влажности почвы и состояния оборудования по всей территории распределенных сельскохозяйственных угодий.

ВЫВОДЫ

Оперативное управление влагообеспечением в условиях неопределенности должно осуществляться с использованием методов адаптивного управления с прогнозирующей моделью. Применение дискретизированного представления уравнения Дарси позволяет анализировать динамику влажности почвы в корнеобитаемом слое в зависимости от ее гидрологических характеристик, вида культивируемых растений, объемов воды, поступающих на поля от поливных систем, грунтовых вод, либо в виде случайных осадков. ИАС влагообеспечением в ирригационной системе обуславливает гарантированное поддержание рациональных условий выращивания культур, а также экономное использование водных и энергетических ресурсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Зайдельман Ф.Р.* Мелиорация почв. — М.: МГУ, 2003. — 448 с.
2. *Рудакова А.В., Шейник С.П., Поливода О.В.* Информационно-управляющая система для систем водораспределения // Вестник Херсонского национального технического университета. — 2009. — № 1(34). — С. 333–337.
3. *Поливода О.В.* Применение спектрального анализа в контуре идентификации состояния информационно-управляющей системы ирригационной сети // Вестник Херсонского национального технического университета. — 2011. — № 2(41). — С. 245–250.
4. *Морозов В.В., Плоткін С.Я., Поляков М.Г.* Моделювання і прогнозування для проектів геоінформаційних систем: Навч. посіб. — Херсон, ХДАУ, 2007. — 328 с.
5. *Поливода О.В. Рудакова А.В., Шейник С.П.* Оптимизация управления влагообеспечением в ирригационных системах // Международная научно-практическая конференция «Технические науки: современные проблемы и перспективы развития», 10 декабря 2012 г. / Приволжский научно-исследовательский центр. — Йошкар-Ола: Коллоквиум, 2013. — С. 120–123.
6. *Поливода О.В., Рыженко Н.И., Рудакова А.В.* Динамическая модель распределения влаги в пахотном слое // Вестник Херсонского национального технического университета. — 2010. — № 3(39). — С. 374–380.
7. *Поливода О.В., Рудакова Г.В., Сарафанникова Н.В.* Использование метода экспоненциального сглаживания для адаптивного управления ирригационной системой // Автоматика–2012: XIX міжнародна конференція з автоматичного управління, Київ, 26–28 вересня 2012 р.: тези доповідей. — Київ: НУХТ, 2012. — С. 118

Поступила 08.07.2013