

С. А. ЦЫБУЛЬНИК, канд. техн. наук, вед. науч. сотр.,
НИУ «УКРНИИЭП»

ДЕКОМПОЗИЦИОННАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВОДООТВЕДЕНИЕМ НА ОЧИСТНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Предложен алгоритм выбора оптимальных параметров комплекса технических средств автоматизированной системы управления отведением смеси производственно-бытовых сточных вод и поверхностного и дренажного стока на очистные сооружения. Вычислительная схема решения задачи основана на декомпозиции исходной глобальной задачи на ряд более простых локальных задач, которые могут быть решены с использованием стандартного метода динамического программирования.

Ключевые слова: водный объект, сточные воды, водоотведение, автоматизированная система управления, комплекс технических средств.

Вступление. Существующее состояние водоотведения в стране делает актуальной задачу внедрения прогрессивных технологий для экологического оздоровления водных объектов страны и поддержания их качественного состояния на должном уровне. Одно из возможных решений проблемы предполагает добавление в существующие схемы водоотведения регулирующих емкостей для приема поверхностного и дренажного стока и модуля управления их работой для совместной подачи производственно-бытовых сточных вод и поверхностного и дренажного стока на очистные сооружения [1]. Для накопления смеси сточных вод и поверхностного и дренажного стока и последующей подачи ее на очистные сооружения используется система из двух регулирующих емкостей. Первая емкость предназначена для регулирования дренажного стока и поверхностного стока, создающегося во время дождя с расчетным периодом однократного превышения его интенсивности. Вторая емкость используется при более интенсивных дождях, а так же для перехвата высокозагрязнённых вод, возникающих в результате техногенных аварий и катастроф. Такой подход позволяет при возникновении чрезвычайных ситуаций, с одной стороны, исключить загрязнение водных объектов, и, с другой – не допустить выведения из строя очистных сооружений.

Регулирование подаваемых на очистку расходов производственно-бытовых сточных вод и поверхностного и дренажного стока позволяет обеспечить соответствие химического состава смеси этих вод требованиям биологического способа очистки на входе биологического звена очистных сооружений.

Для проектирования сети водоотведения, представляющей собой систему каналов и труб, могут использоваться дифференциальные математические модели, описывающие течение сточной воды и перенос загрязнений. Но для целей оперативного управления распределением потоков сточных вод и поверхностного и дренажного стока в сети водоотведения предпочтительнее использовать не прогнозируемые, а измеряемые параметры ее работы. Любая математическая модель всегда имеет определенную погрешность, в то время как любые ошибки прямых замеров значений контролируемых параметров практически нивелируются регулярной корректировкой вырабатываемых на их основе параметров управления.

Для построения автоматизированной системы управления рабочими параметрами сети водоотведения, – расходом и составом проходящих через нее сточных вод – используются датчики автоматизированной системы контроля, от которых информация передается на центральный пункт оперативного управления, где и подвергается обработке. В связи с этим актуальна задача определения оптимальных параметров технической базы, обеспечивающей автоматизацию процессов измерения, сбора, подготовки, представления и обработки информации.

Цель исследования. Разработка алгоритма определения оптимального варианта комплекса технических средств измерения, сбора, хранения и обработки информации для автоматизированной системы управления отведением сточных вод на очистные сооружения.

Постановка задачи. В соответствии с выделяемыми уровнями преобразования информации, автоматизированную систему управления можно представить в виде трёхуровневой древовидной иерархической измерительно-информационной системы [2], структурными элементами которой являются: на 1-м уровне – средства измерения, сбора, подготовки и представления информации; на 2-м уровне – средства передачи информации; на 3-м уровне – средства обработки информации. В подсистемах одного уровня информация преобразуется параллельно, а на разных уровнях – последовательно.

Критерием оценки различных вариантов реализации рассматриваемой измерительно-информационной системы является минимум приведенных затрат на приобретение и эксплуатацию технических средств измерения, сбора, хранения и обработки информации. В качестве основных требований и ограничений системы принимаются время и достоверность преобразования информации.

Результаты исследования. Каждая подсистема, а значит и система в целом, имеет некоторое множество вариантов реализации, характеризуемых временем и достоверностью преобразования информации, а также величиной приведенных затрат. Следовательно, задачу выбора оптимального варианта системы можно сформулировать а терминах дискретного математического программирования.

Пронумеруем подсистемы в соответствии с иерархической структурой слева направо в пределах уровня и снизу вверх по уровням. Пусть L_i – множество номеров подсистем, структурно подчиненных подсистеме i . Тогда время преобразования информации в системе можно выразить как

$$T = \gamma_n t_n + \max_{k \in L_n} \left(\gamma_k t_k + \max_{v \in L_k} \gamma_v t_v \right), \quad (1)$$

где t_i – время преобразования информации в подсистеме i ;

γ_i – коэффициент совмещения времени последовательно работающих подсистем ($0 \leq \gamma_i \leq 1$);

n – число подсистем.

Пренебрегая малыми высшего порядка (произведениями вероятностей), вероятность искажения информации в системе можно определить как

$$P = \sum_{i=1}^n \zeta_i p_i, \quad (2)$$

где p_i – вероятность искажения информации в подсистеме i ;

ζ_i – доля объема информации, проходящего через подсистему i в общем объеме информации, преобразуемой в системе ($0 < \zeta_i \leq 1$).

Для простоты записи далее положим $\gamma_i = \zeta_i = 1$, $i \in \{1 \dots n\}$, так как всегда можно перейти к новым переменным $t'_i = \gamma_i t_i$ и $p'_i = \zeta_i p_i$, $i \in \{1 \dots n\}$. Тогда задачу оптимизации затрат на реализацию комплекса технических средств автоматизированной системы управления отведением сточных вод на очистные сооружения можно записать в виде

$$\min_{t, p} \left\{ \sum_{i=1}^n f_i(t_i, p_i) \mid t_n + \max_{k \in L_n} \left(t_k + \max_{v \in L_k} t_v \right) \leq T_{\text{доп}}, \sum_{i=1}^n p_i \leq P_{\text{доп}}, t_i \in T_i, p_i \in P_i \right\}, \quad (3)$$

где $f_i(\bullet)$ – приведенные затраты на реализацию подсистемы i ;

$T_{\text{доп}}$, $P_{\text{доп}}$ – соответственно, допустимое время преобразования информации и допустимая вероятность ее искажения в системе;

T_i , P_i – соответственно, множества возможных значений времени преобразования информации и вероятности ее искажения в подсистеме i .

Применение известных методов современного аппарата математического программирования для решения задачи (3) непосредственно в сформулированном выше виде невозможно, поскольку значение первого ограничения определяется не аналитическим выражением, содержащим функцию \max . Вместе с тем, как будет показано ниже, можно построить эффективный вычислительный алгоритм, основанный на декомпозиции исходной задачи (3) на ряд более простых задач меньшей размерности, каждая из которых может быть решена стандартным методом динамического программирования.

Рассмотрим вспомогательную задачу

$$\Lambda_k(t_n, \xi_k) = \min_{t_k, p_k, t_v, p_v} \left\{ f_k(t_k, p_k) + \sum_{v \in L_k} f_v(t_v, p_v) \mid \right. \\ \left. t_k + \max_{v \in L_k} t_v \leq T_{\text{доп}} - t_n, p_k + \sum_{v \in L_k} p_v \leq \xi_k, t_n \in T_n, t_k \in T_k, p_k \in P_k, t_v \in T_v, p_v \in P_v \right\}, \quad (4)$$

где ξ_k – вероятность искажения информации в ветви, включающей подсистему k и структурно связанные с ней подсистемы регистрации и сбора информации v ;

$\Lambda_k(\bullet)$ – приведенные затраты на реализацию ветви, начинающейся с подсистемы k .

Решение задачи (4) определяет функцию $\Lambda_k(\bullet)$ на множестве значений $\xi_k(t_n)$. Используя схему поэтапной оптимизации (проекции на пространство связующих ограничений) [3], введем в рассмотрение вспомогательную задачу

$$\Lambda_k^1(t_n, t_k, \xi_k) = \min_{p_k, t_v, p_v} \left\{ f_k(t_k, p_k) + \sum_{v \in L_k} f_v(t_v, p_v) \mid \right. \\ \left. t_v \leq T_{\text{доп}} - t_n - t_k, p_k + \sum_{v \in L_k} p_v \leq \xi_k, p_k \in P_k, t_v \in T_v, p_v \in P_v \right\}. \quad (5)$$

Используя задачу (5), задачу (4) можно преобразовать к виду

$$\Lambda_k(t_n, \xi_k) = \min_{t_k} \left\{ \Lambda_k^1(t_n, t_k, \xi_k) \mid t_k \in T_k \cap V_k \right\}, \quad (6)$$

где V_k – множество значений t_k , при которых задача (5) имеет решение.

Поскольку функции $f_i(\bullet)$ монотонны относительно аргументов, первое ограничение задачи (5) однозначно определяет оптимальные значения t_v ,

$$t_v^*(t_n, t_k) = \max \left\{ t_v \mid t_v \leq T_{\text{доп}} - t_n - t_k, t_v \in T_v \right\}, v \in L_k. \quad (7)$$

Следовательно, задачу (5) можно преобразовать к виду

$$\Lambda_k^1(t_n, t_k, \xi_k) = \min_{p_k, p_v} \left\{ f_k(t_k, p_k) + \sum_{v \in L_k} f_v(t_v^*, p_v) \mid p_k + \sum_{v \in L_k} p_v \leq \xi_k, p_k \in P_k, p_v \in P_v \right\}, \quad (8)$$

где $t_v^*, v \in L_k$ определяются из решения задачи (7).

Масштабируем значения p_i таким образом, чтобы все $p_i, i \in \{1 \dots n\}$ были целыми числами. Тогда задача (8) может быть решена методом

динамического программирования. После чего решение задачи (7), а, следовательно, и задачи (4), сводится к выбору максимального элемента.

Введем в рассмотрение вспомогательную задачу

$$\Lambda_n(t_n) = \min_{P_n, \xi_k} \left\{ f_n(t_n, P_n) + \sum_{k \in L_n} \Lambda_k(t_n, \xi_k) \mid P_n + \sum_{k \in L_n} \xi_k \leq P_{\text{доп}}, P_n \in P_n, \xi_k \in K_k(t_n) \right\}, \quad (9)$$

где $K_k(t_n)$ – множество значений ξ_k , определяемых из решения задачи (4).

Используя задачу (9), решение которой также определяется методом динамического программирования, и схему поэтапной оптимизации, задачу (3) можно преобразовать к виду

$$\min_{t_n} \{ \Lambda_n(t_n) \mid t_n \in T_n \}. \quad (10)$$

Таким образом, исходная задача (3) декомпозирована нами на ряд более простых задач вида (7)-(10). Из них задачи (8), (9) решаются методом динамического программирования, а решение задач (7), (10) сводится к выбору максимального элемента.

Основываясь на изложенных выше результатах, алгоритм решения задачи (3) можно представить в виде следующей вычислительной схемы:

3. Выбрать очередное значение $t_n \in T_n$.
4. Выбрать очередное значение $k \in L_n$.
5. Выбрать очередное значение $t_k \in T_k$.
6. Найти решение задачи (7).
7. Если решения нет, перейти к шагу (9).
8. Найти решение задачи (8).
9. Найти решение задачи (5).
10. Если есть еще $t_k \in T_k$, перейти к шагу 3.
11. Найти решение задачи (10).
12. Если есть еще $k \in L_n$, перейти к шагу 2.
13. Найти решение задачи (9).
14. Если есть еще $t_n \in T_n$, перейти к шагу 1, иначе получено оптимальное решение.

Заметим, что решение задачи (8) для различных $t_k \in T_k$ определяется на одном и том же множестве значений ξ_k . Следовательно, при использовании метода динамического программирования, размерность заключительной таблицы в решении задачи (10) будет не выше, чем в решении задачи (3) при фиксированных значениях $t_i, i \in \{1 \dots n\}$.

Если вместо задачи (9) рассмотреть задачу

$$\Lambda_n(t_n, \xi_n) = \min_{P_n, \xi_k} \left\{ f_n(t_n, P_n) + \sum_{k \in L_n} \Lambda_k(t_n, \xi_k) \mid P_n + \sum_{k \in L_n} \xi_k \leq \xi_n, P_n \in P_n, \xi_k \in K_k(t_n) \right\}, \quad (11)$$

то можно получить все множество возможных вариантов системы, которое характеризует параметрическую зависимость допустимого времени преобразования информации и допустимой вероятности ее искажения в системе от величины приведенных затрат на реализацию системы. При этом возможно рассмотреть задачу в обратной постановке, – "максимум качественных характеристик системы при ограничении на ее стоимость".

Выводы. Рассмотренная постановка задачи может быть использована для целей оптимального проектирования технической базы, обеспечивающей автоматизацию процессов сбора, хранения и обработки информации в автоматизированной системе управления запорно-регулирующей аппаратурой отведения сточных вод на очистные сооружения. Предложенная схема решения может быть использована как при оптимизации затрат на построение технической базы, удовлетворяющей заданным ограничениям, так и при анализе возможных вариантов ее реализации. Алгоритм решения задачи может быть обобщен на произвольное число уровней преобразования информации, что расширяет область его применения за рамки рассмотренной выше постановки задачи.

Список литературы: 1. Дмитриева Е. А. Управление режимами работы систем водоотведения населенных пунктов Украины / Е. А. Дмитриева, С. А. Цыбульник, И. В. Хоренжая [и др.] // Збірник наукових праць СНУЯЕтаП. – Севастополь : СНУЯЕтаП. – 2012. – Вип. 3 (43). – С. 75–81. 2. Артемов А. П. Технические средства информатизации / А. П. Артемов. – Тамбов. : Изд-во ТГТУ, 2002. – 80 с. 3. Первозванский А. А. Математические модели в управлении производством / А. А. Первозванский. – М. : Наука, 1975. – 616 с.

Bibliography (transliterated): 1. Dmitrieva E. A., et al. "Upravlenie rezhimami raboty sistem vodootvedeniya naselennykh punktov Ukrainy." *Zbirnik naukovih prac' SNUJaEtaP.* – Sevastopol: SNUJaEtaP. Vol. 3 (43). 2012. 75–81. Print. 2. Artemov A. P. *Tekhnicheskie sredstva informatizacii.* Tambov: Izd-vo TG TU, 2002. Print. 3. Pervozvanskij A. A. *Matematicheskie modeli v upravlenii proizvodstvom.* Moscow: Nauka, 1975. Print.

Надійшло (received) 13.06.2014