

Оптимальное управление многоступенчатым водоотливом шахт.

В.И. Бессараб, Р.В. Федюн

Донецкий государственный технический университет

Рассмотрены основные принципы построения цифровых систем управления многосвязным многомерным объектом – многоступенчатой водоотливной установкой угольных шахт. Осуществлен анализ и оптимальный синтез системы автоматического управления многоступенчатым водоотливом шахт.

В настоящее время в угольной промышленности Украины наблюдается тенденция освоения все более глубоких горизонтов шахт. Это оказывает огромное влияние на организацию процесса водоотлива. На глубоких шахтах водоотлив, как правило, организуется по многоступенчатой схеме. Наиболее перспективной является схема главного водоотлива с последовательно включенными насосами, расположенными на разных горизонтах - схема "из насоса в насос"[1]. Капитальные и эксплуатационные затраты на схему "из насоса в насос" меньше, чем затраты на схему с промежуточным водосборником. Отрицательной стороной этой технологической схемы водоотлива является жесткая связь между насосами разных горизонтов. В связи с этим изменения режима работы насосов одного горизонта оказывает влияние на работу насосов другого горизонта. Для исследования взаимовлияния и взаимосвязи ступеней водоотлива необходимо разработать модель многоступенчатой водоотливной установки. Для исследований принята трехступенчатая водоотливная установка по схеме "из насоса в насос". Такое упрощение позволяет получить теоретические выкладки и результаты, которые полностью характеризуют особенности систем управления многоступенчатыми водоотливными установками, и могут быть легко обобщены для водоотливов с большим количеством ступеней.

Модель трехступенчатой водоотливной установки. Модель трехступенчатой водоотливной установки состоит из моделей трех ступеней, каждая из которых в свою очередь состоит из модели трубопровода и модели граничных условий.

Нестационарное движение жидкости в трубопроводе описывается следующей системой дифференциальных уравнений в частных производных [2]:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{1}{gS} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\lambda}{2gdS^2} Q^2 + \sin \alpha; \\ -\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{c^2}{gS} \frac{\partial Q}{\partial x} \end{array} \right. \quad (1)$$

где H, Q – напор и расход в данной точке трубопровода; $L, d, S, \lambda l$ – длина, внутренний диаметр, площадь поперечного сечения и коэффициент гидравлического сопротивления трубопровода; x, t – координаты пространства и времени; g – ускорение силы тяжести; α – угол наклона трубопровода к горизонту; i – гидравлический уклон; c – скорость распространения ударной волны; ω – угловая частота вращения ротора насосного агрегата.

Решение дифференциальных уравнений в частных производных (1),(2) является общей методологией получения динамических характеристик любых трубопроводов, но в большинстве своем отпугивает практиков из-за трудностей их интегрирования и громоздкости полученных результатов [2,3]. Учитывая сказанное, динамические процессы в ступени многоступенчатого водоотлива будем получать, используя типовые четырехполюсники динамики [3]. Система дифференциальных уравнений (1),(2) путем упрощений и преобразований приводится к системе уравнений в операторной форме Лапласа [3].

Динамика изменения расхода и давления в начале и в конце ступени может быть описана следующим соотношением [3]:

$$\begin{array}{l} Q_2(p) = W_{Q_2Q_1}(p)Q_1(p) - W_{Q_2P_1}(p)P_1(p) \\ P_2(p) = -W_{P_2Q_1}(p)Q_1(p) + W_{P_2P_1}(p)P_1(p) \end{array} \quad (3)$$

где $P_1(p), Q_1(p), P_2(p), Q_2(p)$ - давление и расход в начале и конце трубопровода соответственно; $W(p)$ - динамические соотношения (передаточные функции) по соответствующим каналам (канал взаимосвязи определяется индексом).

Используя выражение (3) как базовое, можно путем аналитических преобразований получить структуру модели ступени многоступенчатого водоотлива при различных комбинациях входных и выходных переменных. Входными переменными для трубопровода ступени водоотлива являются расходы в начале Q_1 и в конце Q_2 трубопровода. Выходными переменными принимаются напоры в начале H_1 и в

конце H_2 трубопровода. Структурная схема модели трубопровода и параметры передаточных функций по всем каналам взаимосвязи приведены в [3].

На динамические свойства трубопровода оказывают влияние граничные условия. Граничные условия трубопровода определяются характеристиками насосной установки. Для водоотлива горных предприятий характерен следующий состав насосной установки: центробежный секционный насос, асинхронный приводной электродвигатель, управляемая задвижка. Структура граничных условий определяется динамическими свойствами элементов насосной установки, применяемым способом управления водоотливной установкой и структурной схемой модели трубопровода.

Анализ существующих способов управления показал, что для условий горных предприятий наиболее приемлемо управление дросселированием нагнетательного трубопровода управляемой задвижкой.

В результате исследований получена модель граничных условий, которая отражает сущность процессов в насосной установке, удовлетворяет принятой структурной схеме трубопровода и выбранному способу управления.

Модель трехступенчатой водоотливной установки приведена на рис. 1.

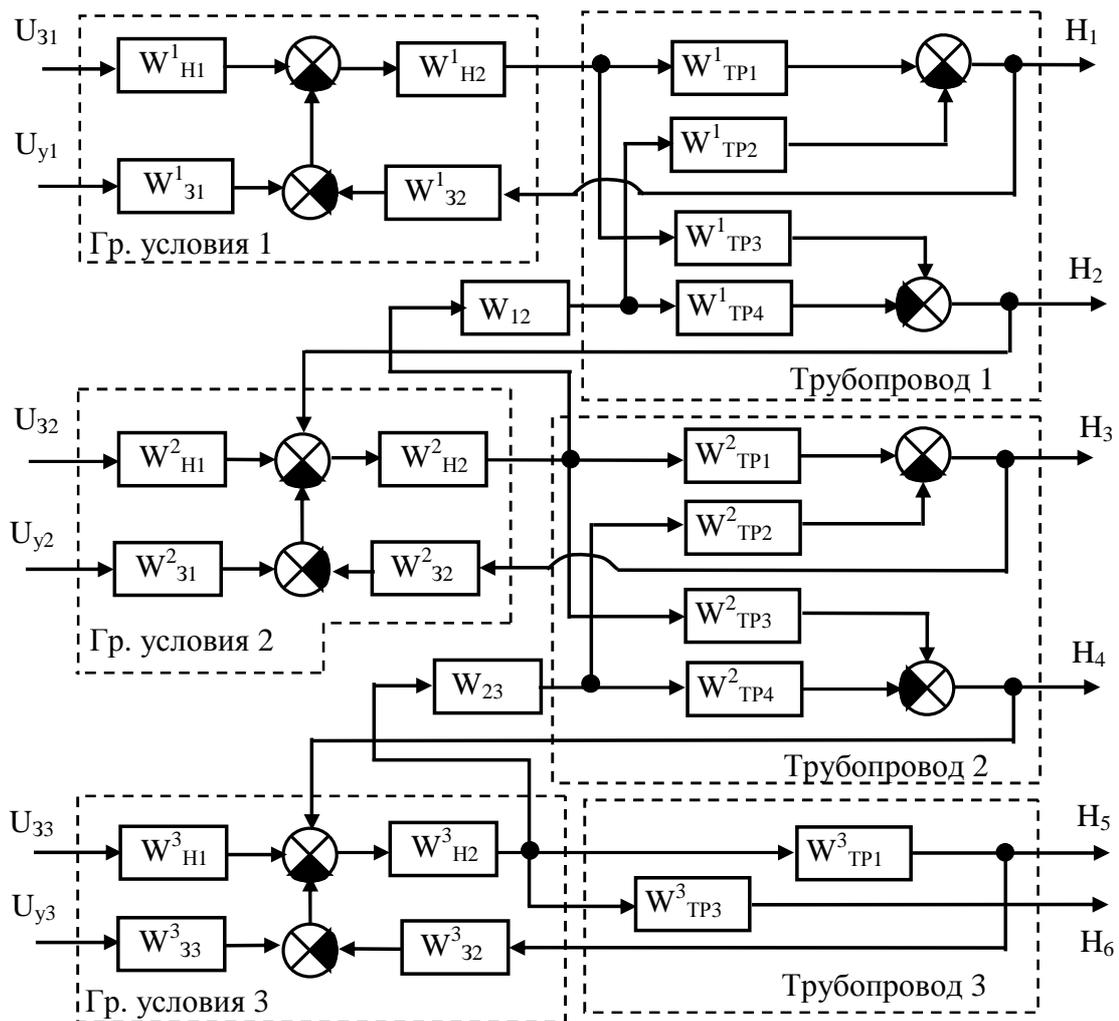


Рисунок 1.– Структурная схема модели трехступенчатой водоотливной установки.

Моделирование динамических процессов в трехступенчатой водоотливной установке осуществлено с помощью пакета MATLAB. На рисунке 2 приведены кривые переходных процессов в объекте управления по всем выходным координатам.

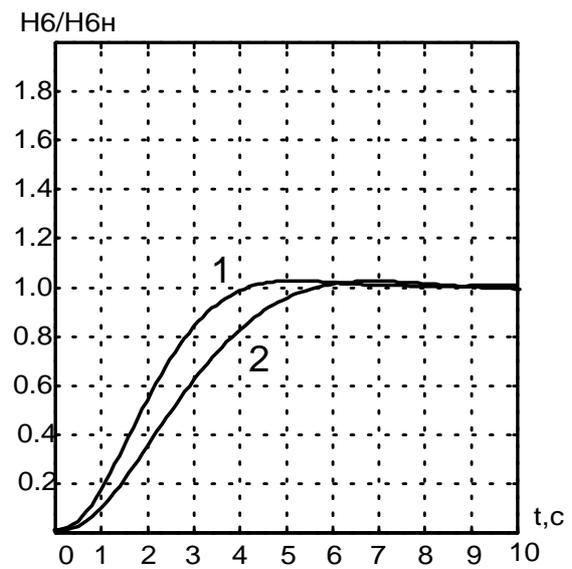
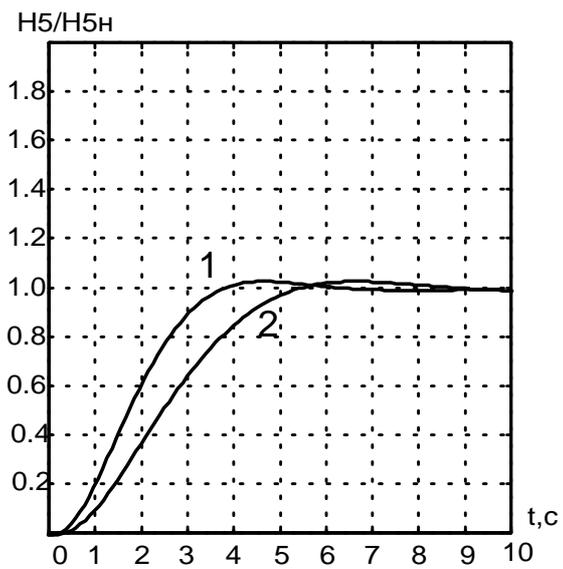
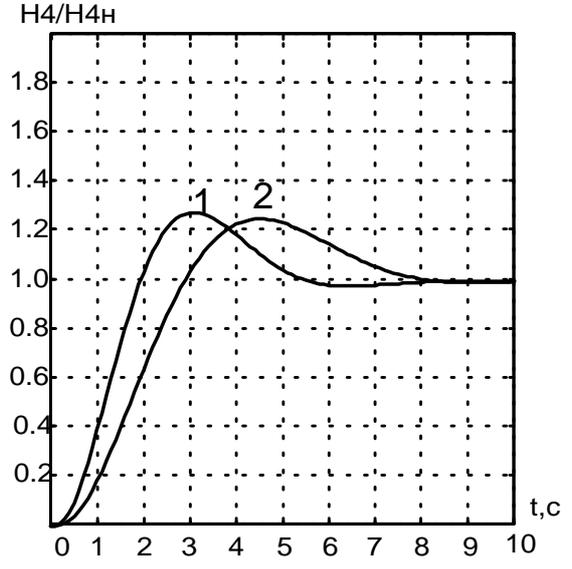
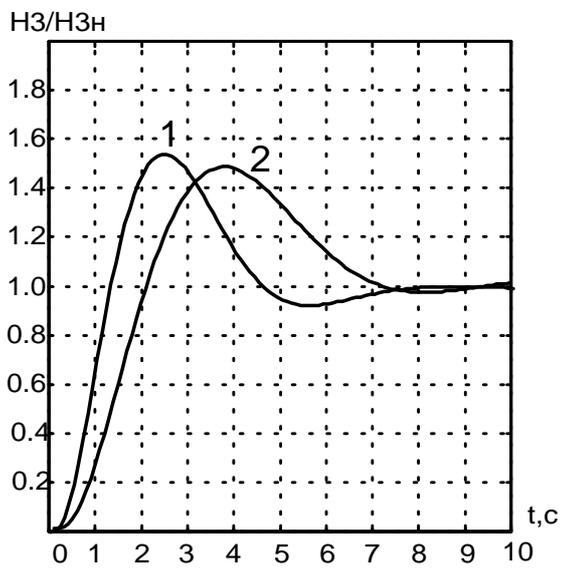
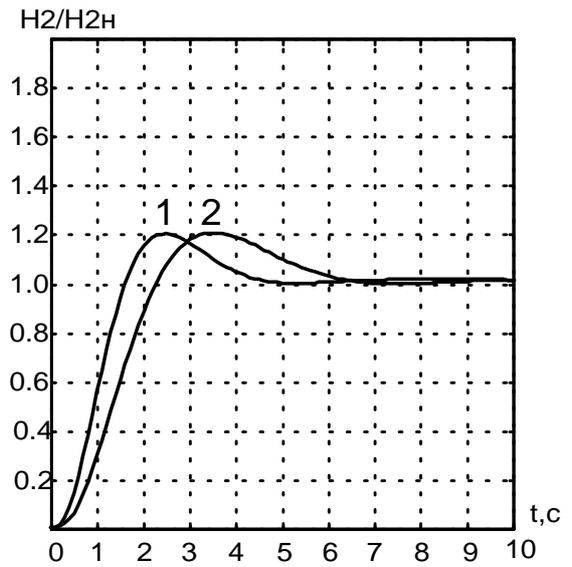
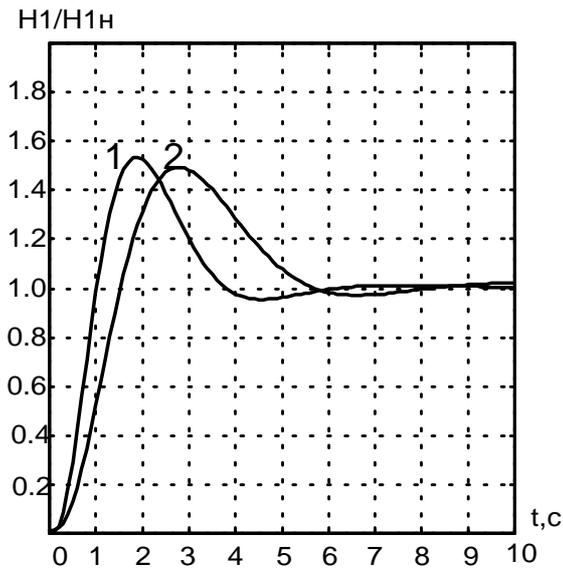


Рисунок 2. - Кривые переходных процессов в объекте управления.

Переходные процессы в трехступенчатой водоотливной установке получены для различных технологических параметров. Кривая 1 – подача 200 м³/ч, высота ступени – 350 м (насос НСШ 200 – 90...450); кривая 2 - подача 300 м³/ч, высота ступени – 500 м (насос НСШ320 – 144...720).

Анализ кривых переходных процессов выявил их неудовлетворительность. Существенное перерегулирование выходных координат приводит к повышенному напору на входе и выходе ступени. Это вызывает повреждение и преждевременный износ технологического оборудования водоотлива. Для улучшения показателей качества переходных процессов, а следовательно повышения эффективности функционирования многоступенчатого водоотлива необходимо осуществить синтез системы автоматического управления.

Модель объекта управления в пространстве состояний. Одним из современных методов, который позволяет решить задачу анализа и синтеза многомерной, многосвязной системы, является метод пространства состояний [4].

На основании результатов моделирования, с учетом выбранного способа управления получена модель объекта управления в пространстве состояний [5], которая в стандартной векторно-матричной форме имеет вид:

$$\dot{\bar{x}}(t) = \mathbf{A}\bar{x}(t) + \mathbf{B}\bar{u}(t) \quad (4)$$

$$y(t) = \mathbf{C}\bar{x}(t) + \mathbf{D}\bar{u}(t) \quad (5)$$

где $\bar{x}(t)$ - вектор состояния размерностью (n×1); $\bar{y}(t)$ - вектор выхода размерностью (m×1); $\bar{u}(t)$ - вектор входа размерностью (r×1); \mathbf{A} - матрица динамики объекта размерностью (n×n); \mathbf{B} - матрица входа объекта размерностью (n×r); \mathbf{C} - матрица выхода объекта размерностью (m×n); \mathbf{D} - матрица входа объекта размерностью (r×n); n – количество переменных состояния (n=14); m – количество выходных переменных (m=6); r – количество входных переменных (r=3).

Входные (управляющие координаты) – воздействия на управляемые задвижки насосных установок разных горизонтов: U_{y1}, U_{y2}, U_{y3} . Выходные координаты – напор на входе и выходе трубопровода ступени: напор на входе в трубопровод H_1, H_3, H_5 и напор на выходе ступени (подпор на входе в насос следующей ступени) H_2, H_4, H_6 . В качестве переменных состояния выбраны гидравлические параметры перекачки – напор и подача в различных точках водоотливной установки.

В настоящее время широкое распространение получили цифровые управляющие устройства. Системы управления с такими устройствами являются дискретными. Для дискретной системы уравнения (4),(5) имеют следующий вид [5]:

$$\bar{x}(k+1) = \mathbf{\Phi}\bar{x}(k) + \mathbf{H}\bar{u}(k), \quad (6)$$

$$\bar{y}(k) = \mathbf{C}\bar{x}(k), \quad (7)$$

где $\mathbf{\Phi}$ – матрица динамики объекта; \mathbf{H} – матрица входа объекта.

В результате исследований объекта управления на управляемость и наблюдаемость установлено, что трехступенчатая водоотливная установка, описываемая уравнениями (6) и (7), является полностью управляемым и полностью наблюдаемым объектом [5].

Синтез алгоритма оптимального управления. В силу технологических особенностей функционирования многоступенчатой водоотливной установки известно, что к переходным процессам по координатам, характеризующим режим перекачки, предъявляются требования монотонности. Кроме того, на технологические параметры, принятые в качестве переменных состояния, выходных величин и управляющих координат наложены естественные технические ограничения (предельное допустимое давление, минимальный подпор на входе в насос, максимальная подача насосов из условия кавитации).

Как показывает анализ, при синтезе алгоритмов управления многомерных многосвязных систем наибольшее распространение получили следующие критерии качества – критерий оптимальности по быстродействию, критерий оптимальности по точности в динамических режимах, обобщенный квадратичный критерий качества, критерий обобщенной работы А.А. Красовского.

Для исследуемого объекта наиболее подходит обобщенный квадратичный критерий качества. Он позволяет получить требуемый вид кривых переходных процессов при оптимальном быстродействии. Квадратичный критерий – это один из критериев, при котором для линейных систем получается оптимальный закон управления с обратной связью по состоянию (выходу). Синтез алгоритма оптимального управления состоит в формировании такого вектора управляющих переменных $u(k)$ из вектора переменных состояния $x(k)$, который переводит систему в конечное состояние и минимизирует следующий функционал [6]:

$$I = \bar{x}^T(N)\mathbf{S}\bar{x}(N) + \sum_{k=0}^{N-1} [\bar{x}^T(k)\mathbf{Q}\bar{x}(k) + \bar{u}^T(k)\mathbf{R}\bar{u}(k)]. \quad (8)$$

где \mathbf{S} , \mathbf{Q} , \mathbf{R} – матрицы весовых коэффициентов.

Определение оптимального управления является задачей динамической оптимизации, которая может быть решена с использованием методов вариационного исчисления, принципа максимума Понтрягина или принципа оптимальности Беллмана [6].

В общем случае в центре проблемы расчета оптимальных замкнутых систем лежит уравнение Риккати. Для дискретных систем матричное нелинейное уравнение Риккати имеет вид:

$$\mathbf{P}(k) = \Phi^T \mathbf{P}(k+1) \Phi - \Phi^T \mathbf{P}(k+1) \mathbf{H} [\mathbf{R} + \mathbf{H}^T \mathbf{P}(k+1) \mathbf{H}]^{-1} \cdot \mathbf{H}^T \mathbf{P}(k+1) \Phi + \mathbf{Q} \quad (9)$$

где $\mathbf{P}(k)$ – коэффициент Риккати - матрица размерностью $n \times n$.

Алгоритм оптимального управления имеет следующий вид [6]:

$$\bar{u}^o(k) = -\mathbf{K}(k) \bar{x}(k) \quad (10)$$

где $\mathbf{K}(k)$ – матрица коэффициентов обратной связи, которая определяется из выражения:

$$\mathbf{K}(k) = [\mathbf{R} + \mathbf{H}^T \mathbf{P}(k+1) \mathbf{H}]^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{P}(k+1) \Phi \quad (11)$$

Для бесконечного интервала времени, или бесконечного числа шагов $N = \infty$, критерий качества (8) принимает вид:

$$I = \sum_{k=0}^{\infty} [\bar{x}^T(k) \mathbf{Q} \bar{x}(k) + \bar{u}^T(k) \mathbf{R} \bar{u}(k)]. \quad (12)$$

В этом случае терминальная составляющая $x^T(N) \mathbf{S} x(N)$ в критерии качества отсутствует, поскольку при бесконечном увеличении N конечное состояние $x(N)$ должно стремиться к нулю (положению равновесия).

Важное требование при синтезе линейного оптимального регулятора на бесконечном интервале времени состоит в том, что замкнутая система должна быть асимптотически устойчивой. Система, описываемая уравнениями (6), (7) должна удовлетворять условиям:

- пара $[\Phi, \mathbf{H}]$ должна быть полностью управляемой;
- пара $[\Phi, \mathbf{C}]$ должна быть полностью наблюдаемой.

Эти условия для данного объекта полностью выполняются.

Тогда решение задачи синтеза оптимального цифрового регулятора на бесконечном интервале времени может быть получено путем подстановки $k \rightarrow \infty$. При $N \rightarrow \infty$ матричный коэффициент Риккати $\mathbf{P}(k)$ становится постоянной матрицей:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \mathbf{P}(k) = \mathbf{P}. \quad (13)$$

Заменяя в уравнении (9) $\mathbf{P}(k+1)$ и $\mathbf{P}(k)$ на \mathbf{P} , получаем алгебраическое уравнение Риккати:

$$\mathbf{P} = \Phi^T \mathbf{P} \Phi - \Phi^T \mathbf{P} \mathbf{H} [\mathbf{R} + \mathbf{H}^T \mathbf{P} \mathbf{H}]^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{P} \Phi + \mathbf{Q} \quad (14)$$

На основании (10) выражение для оптимального управления имеет вид:

$$\bar{u}^o(k) = -\mathbf{K} \bar{x}(k). \quad (15)$$

В этом случае матрица обратной связи является постоянной и получен регулятор с постоянными параметрами:

$$\mathbf{K} = (\mathbf{R} + \mathbf{H}^T \mathbf{P} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{P} \Phi. \quad (16)$$

Для замкнутой системы из уравнений (6) и (10) имеем:

$$\bar{x}(k+1) = [\Phi - \mathbf{H} \mathbf{K}] \bar{x}(k). \quad (17)$$

Соответствующее уравнению (17) характеристическое уравнение записывается в виде:

$$\det[z\mathbf{I} - \Phi + \mathbf{H} \mathbf{K}] = 0. \quad (18)$$

Эта замкнутая система является асимптотически устойчивой, если объект (6), (7) обладает свойством полной управляемости. Трехступенчатая водоотливная установка, как показали выше проведенные исследования на управляемость и наблюдаемость, полностью управляема. Таким образом, замкнутая система с полученным регулятором состояния асимптотически устойчива.

Для оценки эффективности алгоритма оптимального управления выполнено моделирование переходных процессов в замкнутой системе управления. Результаты моделирования приведены на рисунке 3.

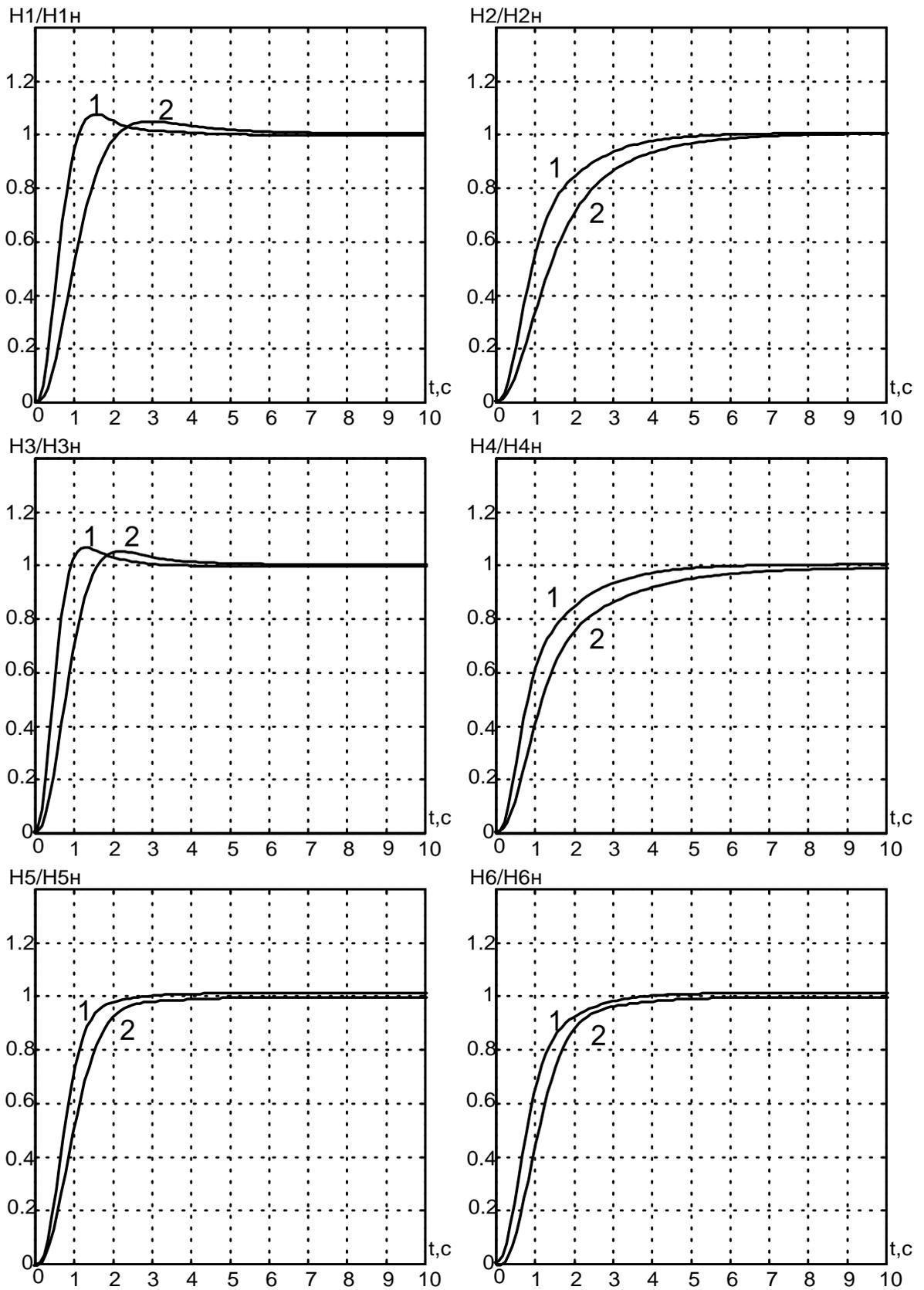


Рисунок 3 - Кривые переходных процессов в замкнутой системе управления.

Основные трудности, с которыми приходится сталкиваться при решении задач синтеза алгоритма оптимального управления – выбор элементов весовых матриц \mathbf{S} , \mathbf{Q} , \mathbf{R} в выражении функционала качества (8).

Каждый член функционала качества (8) влияет на технические свойства проектируемой системы определенным образом. Так, слагаемое $\bar{x}^T(k)\mathbf{Q}(k)\bar{x}(k)$ оценивает отклонение фазовых координат от желаемых. Слагаемое $\bar{u}^T(k)\mathbf{R}(k)\bar{u}(k)$ оценивает стоимость управления (часто называют затратами энергии на управление). Слагаемое $\bar{x}^T(N)\mathbf{S}(N)\bar{x}(N)$ гарантирует относительно малую ошибку в конечный момент времени N , его необходимо учитывать в том случае, когда влияние величины $x(k)$ в конечный момент времени (установившееся значение) особенно важно.

Вес каждой управляющей переменной можно задать независимо, так что матрица \mathbf{R} может быть представлена в диагональной форме. Веса отдельных переменных состояния в большинстве случаев также задаются с помощью диагональной матрицы \mathbf{Q} .

Применительно к трехступенчатой водоотливной установке при принятых переменных состояния можно считать, что допустимые отклонения фазовых координат в любой момент времени вносят в функционал качества одинаковый вклад, так как представляют собой переменные одной физической природы – гидравлические параметры процесса перекачки (напор и подача). Аналогичные рассуждения можно распространить и на отклонения сигналов управления.

Выше изложенные особенности положены в основу исследования влияния элементов матрицы веса на показатели качества переходных процессов в замкнутой системе управления. По полученным зависимостям перерегулирования σ_i и времени регулирования t_{pi} от коэффициентов веса матрицы \mathbf{Q} определены оптимальные значения элементов. Разработаны рекомендации по выбору опорных значений элементов матрицы веса \mathbf{Q} в зависимости от технических и технологических параметров объекта управления. Кривые переходных процессов в замкнутой системе управления, приведенные на рис.3, получены для системы управления, матрица обратной связи \mathbf{K} которой рассчитана с использованием этих рекомендаций.

Выводы.

1. Многоступенчатая водоотливная установка является многомерным, многосвязным объектом управления.
2. Качество переходных процессов в объекте управления по выходным координатам неудовлетворительно.
3. Модель объекта управления в пространстве состояний позволяет формализовать процесс анализа и синтеза системы автоматического управления.
4. Синтез алгоритма оптимального управления наиболее целесообразно выполнять на основании обобщенного квадратичного критерия качества.
5. Рекомендации по выбору весовых матриц критерия качества позволяют более целенаправленно выбирать опорные значения элементов матрицы веса.
6. Показатели качества переходных процессов в замкнутой системе управления удовлетворяют заданным для объектов данного класса.

Список литературы:

1. Бессараб В.І., Федюн Р.В. Принципы моделирования динамических процессов в многоступенчатых водоотливных установках. Наукові праці ДонДТУ. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація, випуск 12. Донецьк: ДонДТУ, ТОВ “Лебідь” – 1999, с.33-40.
2. Тимошенко Г.М. Научные основы проектирования и эксплуатации насосных установок в переходных режимах. Киев; Донецк: Вища шк. Головное изд-во, 1986.- 127с.
3. Чермак И., Петерка В., Заворка И. Динамика регулируемых систем в теплоэнергетике и химии. М.: Мир, 1972.– 624 с.
4. Стрейц В. Метод пространства состояний в теории дискретных линейных систем управления./Перевод с англ. под ред. Я.З. Цыпкина.- Москва, Наука, 1985.-296с.
5. Бессараб В.І., Федюн Р.В. Дослідження багатоступінчатої водовідливної установки методом простору станів. Наукові праці ДонДТУ. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація, випуск 20. Донецьк, ДонДТУ – 2000, с.16 – 22.
6. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления: Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1986. – 448 с.