

РЕАЛИЗАЦИЯ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПД- И ПИД-РЕГУЛИРОВАНИЯ

Юрий Ромасевич

Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины
Украина, г. Киев, ул. Героев Оборона, 15

Аннотация. Приведены рекомендации относительно реализации оптимального управления в виде обратной связи. Для управления движением динамических систем предлагается использовать квазиоптимальный регулятор с дополнением в виде нелинейной функции типа „насыщение”.

Ключевые слова: оптимальное управление, квазиоптимальный регулятор, обратная связь.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Для синтеза оптимального управления движением динамических систем в виде обратной связи используется метод динамического программирования [1]. Важным вопросом является реализация синтезированных оптимальных управлений на практике.

Погрешность задания фазовых координат объекта управления может быть достаточно большой. Поэтому управление на некоторых этапах движения системы может быть недопустимо большим. Конечно, привод динамической системы не в состоянии реализовать любое значение управления. Возможности привода ограничены его перегрузочной способностью [2]. Поэтому вводятся разные ограничения типа $|u| \leq u_{\max}$, или более сложные (модифицированные) ограничения для электрического привода:

$$\begin{cases} |u| \leq u_{\max}; \\ I \leq I_{\max}, \end{cases} \quad (1)$$

где u_{\max} - максимальное значение управляющего усилия (допустимый электромагнитный момент двигателя); I_{\max} - максимальное значение тока электропривода или предельно допустимого тока преобразователя, который питает двигатель.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для того, чтобы удовлетворить поставленные требования (1) без необоснованного завышения мощности электропривода необходимо использовать определенные способы. Одним из таких способов есть вариация весовых коэффициентов, которые входят в структуру интегрального критерия качества движения системы [3]. Заметим, что такой способ позволяет на протяжении всего процесса управления находиться „в рамках” оптимального управления.

Еще один способ учесть ограничения – использовать принцип максимума Понтрягина [4]. Однако, принцип максимума в общем случае не позволяет получить оптимальное управление в виде обратной связи.

Другими методами, которые позволяют учесть ограничение на управление, есть разные итерационные процедуры [5-8]. На каждом шагу вычисления управления выполняется проверка ограничений и выдача оптимального значения управления.

Для управления движением динамических систем часто используются ПИД-регуляторы. Настройка коэффициентов усиления соответствующих составляющих регулятора дает возможность получить

переходные процессы приближенные к оптимальным [9-14] (по интегральными критериями, по критерию отсутствия перегулирования, на заданный запас стойкости и т.д.). Однако такие способы в значительной степени плохо формализованы, хотя и более универсальны, чем методы аналитического конструирования регуляторов [15].

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью данного исследования является реализация оптимального управления одномассовой и двумассовой динамическими системами с помощью ПД- и ПИД-регулирования. Для достижения поставленной цели ставятся такие задачи: 1) оценить динамику движения одномассовой системы при управлении с помощью квазиоптимального регулятора; 2) оценить динамику движения двумассовой динамической системы „кран – гибкий подвес – груз” при управлении с помощью квазиоптимального регулятора; 3) указать преимущества в использовании квазиоптимальных регуляторов по сравнению с классическими оптимальными регуляторами.

$$I = \int_0^T [k_1 \Delta x_1^2 + k_2 \Delta x_2^2 + (1 - k_1 - k_2) u^2] dt, \quad (3)$$

где k_1, k_2 - весовые коэффициенты, которые учитывают доли соответствующих слагаемых в критерии; T – продолжительность движения системы. В результате использования метода динамического программирования получим следующую форму оптимального управления:

$$u = u(\Delta x_1, \Delta x_2, A_1, A_2), \quad (4)$$

где A_1, A_2 - найденные в процессе оптимизации режима движения системы коэффициенты.

Однако, как уже было указано выше, при достаточно больших значениях Δx_1 и Δx_2 ограничение $|u| \leq u_{\max}$ может не выполняться.

Одним из способов учесть ограничение $|u| \leq u_{\max}$ есть дополнение регулятора нелинейным элементом типа

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проведения исследований примем простейшую динамическую систему, которая описывается системой дифференциальных уравнений в форме Коши [16]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2; \\ \dot{x}_2 = u, \end{cases} \quad (2)$$

где x_1 – обобщенная координата динамической системы (линейное перемещение системы); u – функция управления системой (например электромагнитный момент двигателя); точка над символом означает дифференцирование по времени.

Для дальнейшего исследования выполним замену переменных: будем в качестве фазовых координат системы рассматривать разности конечных и фактических фазовых координат системы: $x_1(T) - x_1 = \Delta \delta_1, x_2(T) - x_2 = \Delta \delta_2$.

Оптимизация выполняется путем минимизации квадратичного интегрального функционала:

„насыщение” (рис. 1). На рис. 1. изображена структура квазиоптимального регулятора. Регулятор работает таким образом. Из выхода сумматора (обозначенный на схеме Σ) получаем сигнал оптимального управления. Однако, этот сигнал может превышать допустимые ограничения и неравенство $|u| \leq u_{\max}$ не будет выполняться. Для того, чтобы данное неравенство выполнялась при $t \in [0, T]$ необходимо к выходу сумматора подключить нелинейный элемент типа „насыщение”. В результате из выхода нелинейного элемента получим квазиоптимальное управление u_{opt}^* , которое будет представляться кусочной функцией, составленной из участков оптимального управления u_{opt} и участков $|u| = u_{\max}$. Другими словами нелинейный элемент типа

насыщения будто „обрезывает” куски неравенство $|u| \leq u_{\max}$.
 функции u_{opt} для которых не выполняется

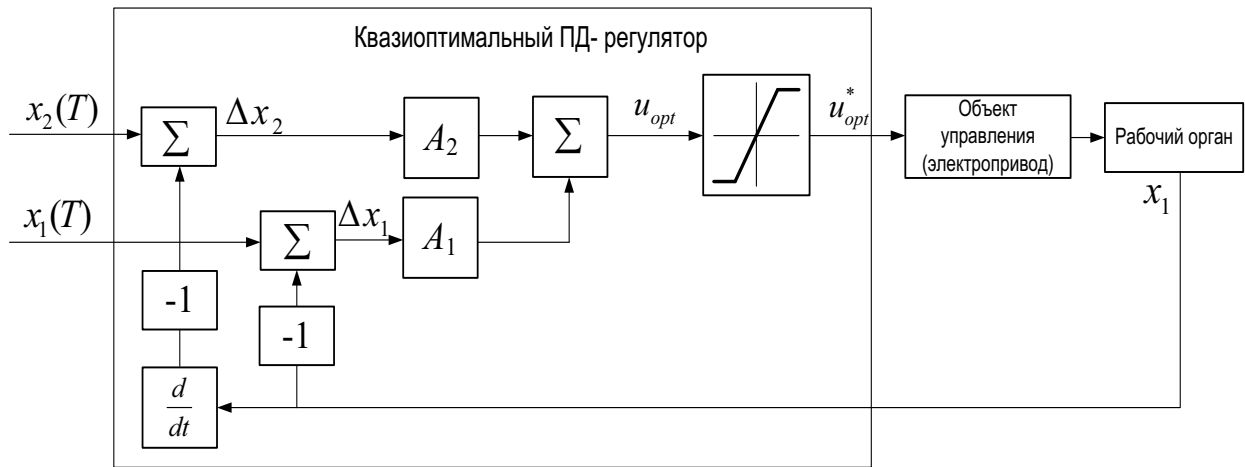


Рис. 1. Структурная схема квазиоптимального ПД-регулятора

Общее выражение для квазиоптимального управления представляется в виде:

$$u_{opt}^* = \begin{cases} u_{\max}, & \text{если } u_{opt} \geq u_{\max}; \\ u_{opt}, & \text{если } u_{\min} < u_{opt} < u_{\max}; \\ u_{\min}, & \text{если } u_{opt} \leq u_{\min}. \end{cases} \quad (5)$$

На рис. 2 показаны графики, которые иллюстрируют работу оптимального регулятора без нелинейного элемента типа „насыщение”. Из графика функции $\Delta x, \text{ м/с}$

управления (рис. 2, б) видно насколько большое значение управления может быть в начале движения системы. Этот недостаток можно устранить, если использовать более общие критерии, например такие, которые учитывают высшие производные функции управления. Однако, функция управления полученная по другим критериям остается функцией фазовых координат системы, а они могут принимать достаточно большие значения.

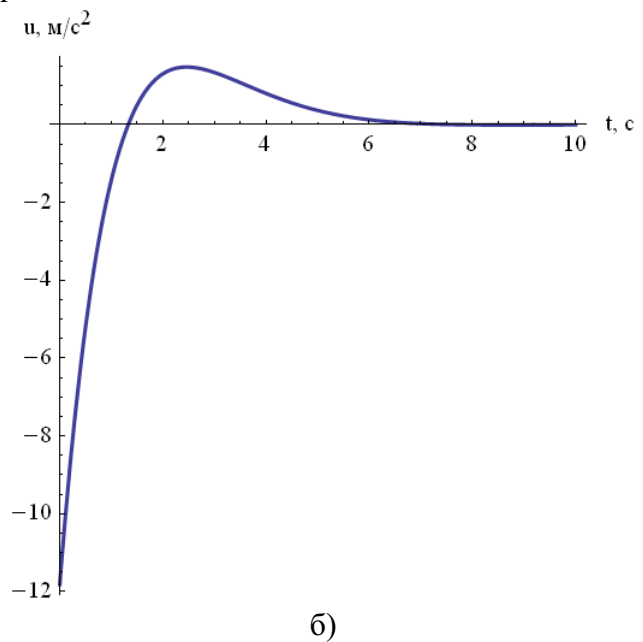
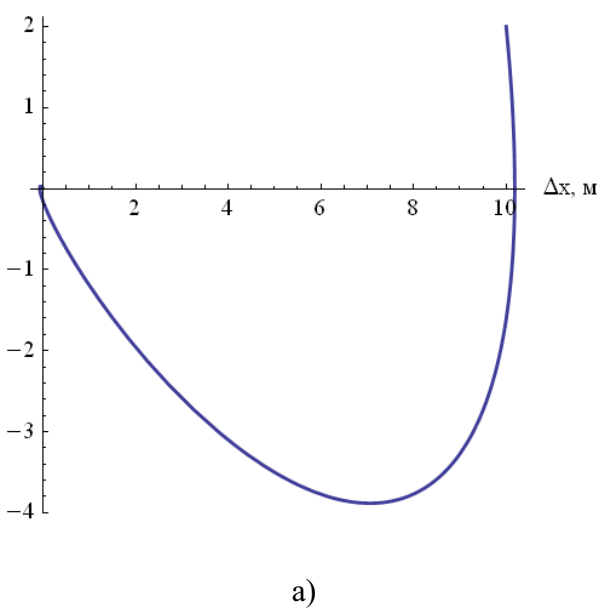


Рис. 2. Фазовый портрет (а) и график функции управления (б) динамической системой при классическом оптимальном ПД-регулировании.

Приведем графики, которые при квазиоптимальном регулировании иллюстрируют динамику движения объекта (рис. 3).

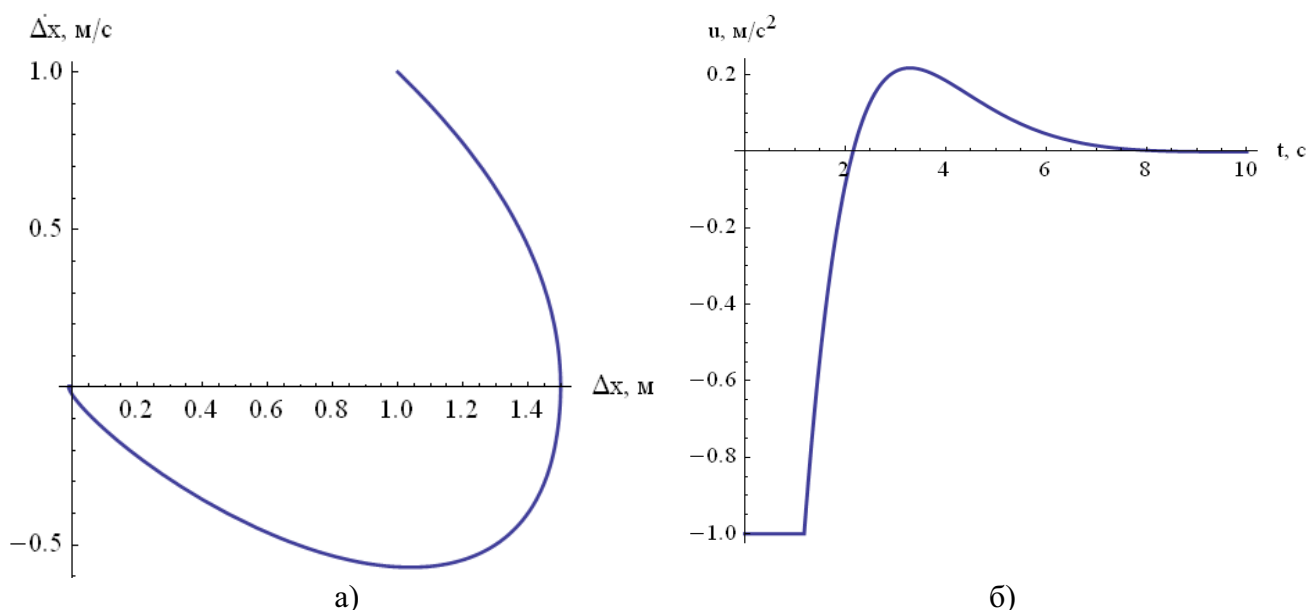


Рис. 3. Фазовый портрет (а) и график функции управления (б) динамической системой при квазиоптимальном ПД-регулировании

Для построения графиков принято $u_{\max} = -u_{\min} = 1 \text{ } \dot{\text{н}}^2$. Приведем графики фазового портрета и функции управления

для „слабого” управления ($u_{\max} = -u_{\min} = 0,1 \text{ } \dot{\text{н}}^2$).

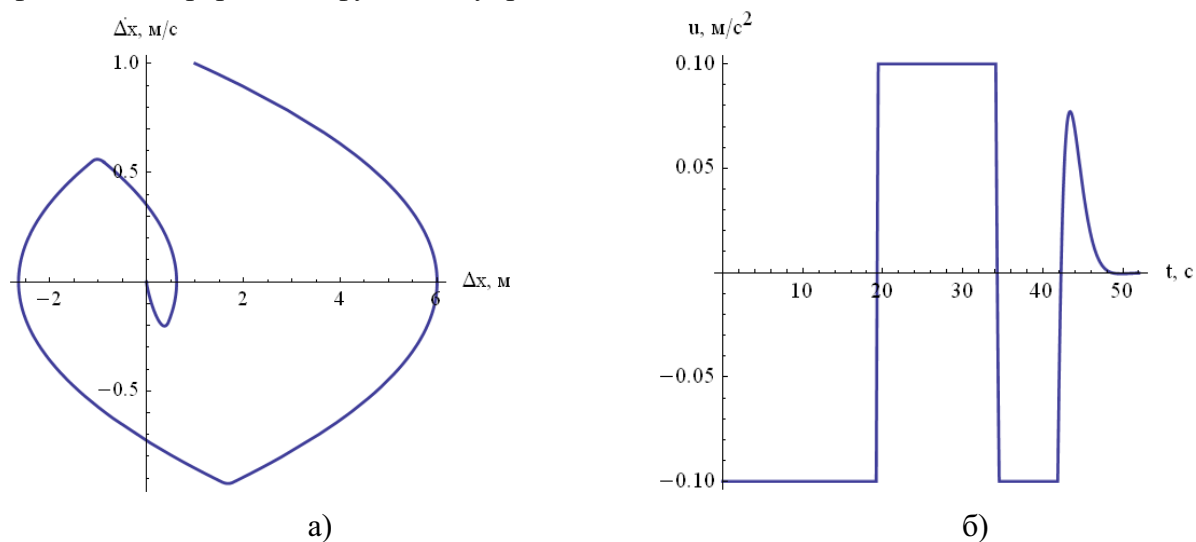


Рис. 4. Фазовый портрет (а) и график функции управления (б) динамической системой при квазиоптимальном „слабом” ПД-регулировании

Очевидно, что с уменьшением максимально-допустимой величины функции управления увеличивается продолжительность процесса движения системы. Уменьшение величины максимально-допустимого управления позволяет проектировать привод динамической системы меньшей мощности.

Приведем результаты дополнения оптимального ПИД-регулятора нелинейным элементом типа „насыщение”, который используется для управления динамической

системой „кран – гибкий подвес – груз”. Эта система описывается системой дифференциальных уравнений в форме Коши:

$$\begin{cases} \dot{y}_0 = y_1; \\ \dot{y}_1 = y_2; \\ \dot{y}_2 = u - \Omega^2 y_1, \end{cases} \quad (6)$$

где Ω – частота собственных маятниковых колебаний груза относительно подвижной

точки подвеса ($\Omega = \sqrt{\frac{(m_1 + m_2)g}{m_1 l}}$, где m_2 – масса груза, l – длина гибкого подвеса груза, g – ускорение свободного падения); y_0, y_1, y_2 – фазовые координаты системы ($y_0 = \frac{l}{g} \dot{x}_2, y_1 = \frac{l}{g} \ddot{x}_2, y_2 = \frac{l}{g} \ddot{\ddot{x}}_2$, где x_2 – координата центра масс груза); u – функция

управления краном ($u = \frac{F - W}{m_1}$, где F – суммарное тяговое или тормозное усилие, которое действует на кран; W – приведенная сила сопротивления перемещению крана, m_1 – приведенная к поступательному движению масса приводного механизма и крана). Для устранения колебаний груза и остановки крана используется следующая структура квазиоптимального ПИД-регулятора (рис. 5).

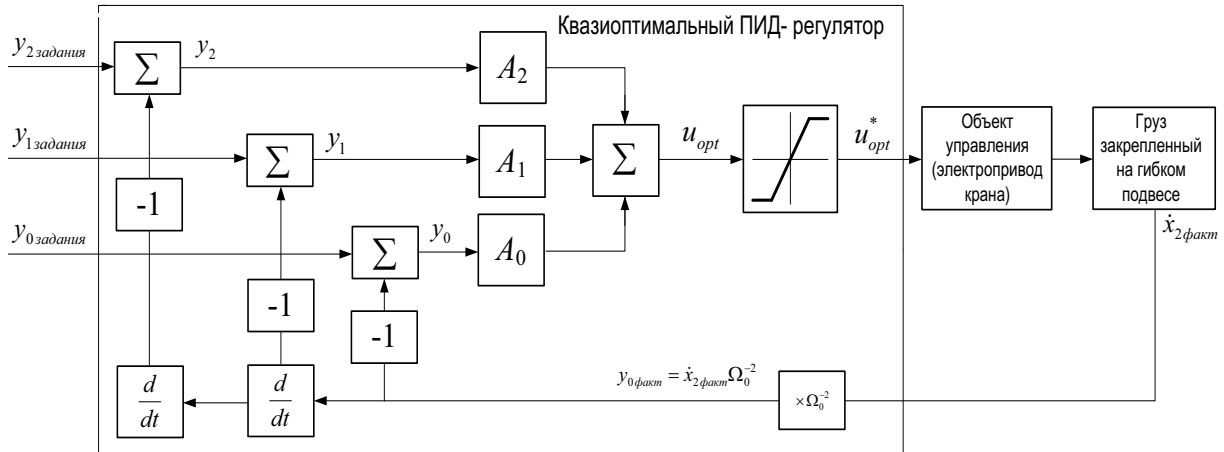
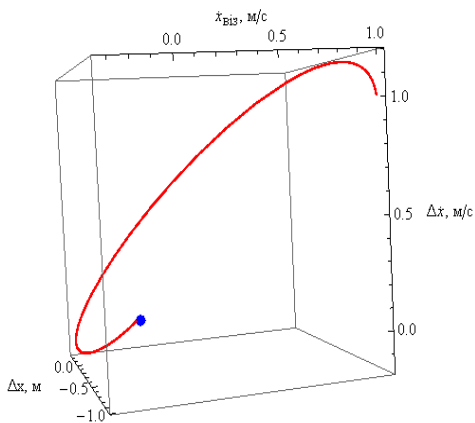


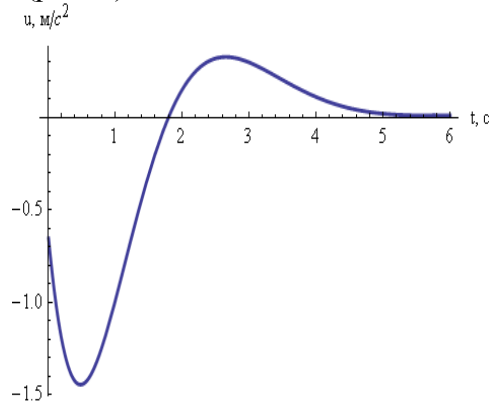
Рис. 5. Структурная схема квазиоптимального ПИД-регулятора для управления движением крана с грузом на гибком подвесе

На рис. 5: A_0, A_1, A_2 – коэффициенты усиления соответствующих составляющих оптимального ПИД-регулятора; Ω_0 – частота собственных маятниковых колебаний груза относительно неподвижной точки подвеса

($\Omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$). Использование приведенного оптимального ПИД-регулятора без функции типа „насыщение” дает такие результаты (рис. 6).



а)



б)

Рис. 6. Модифицированный фазовый портрет (а) и график функции управления (б) динамической системой „кран – гибкий подвес – груз” при классическом оптимальном ПИД-регулировании.

Точкой на рис. 6, а показано начало координат. Из рис. 6, б видно, что функция управления приобретает минимум, причем

модуль минимума является величиной достаточно большой. При реализации такого управления возникают проблемы с

перегрузочной способностью привода. Кроме того, ограничивается также величина ускорения крана, поскольку крановые колеса при его движении могут пробуксовывать.

Использование квазиоптимального регулятора приведенного на рис. 5 дает такие результаты (рис. 7). Точкой на рис. 7, а указано начало координат. Фазовая точка на протяжении торможения крана с грузом на гибком подвесе движется к началу координат. Это означает, что скорость крана, угол отклонения каната от вертикали и его

первая производная по времени стремятся к нулю, что и требуется по условиям задачи [17, 18]. Можно указать также недостаток присущий данному типу управления: в точках перехода из области максимального значения управления в область оптимального управления первая производная функции управления по времени имеет разрывы первого рода, которые в некоторой мере повышают требования к приводному механизму [19, 20].

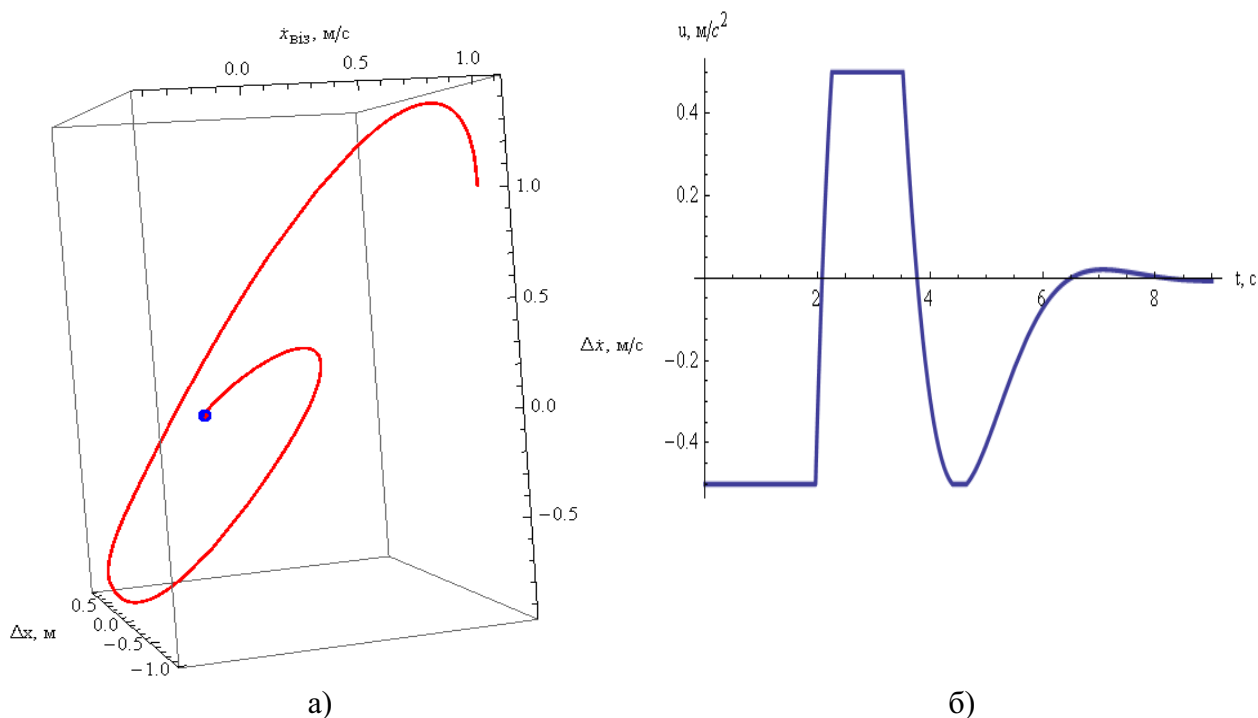


Рис. 7. Модифицированный фазовый портрет (а) и график функции управления (б) динамической системой „кран – гибкий подвес – груз” при квазиоптимальном ПИД-регулировании

ВЫВОДЫ

Использование квазиоптимальных регуляторов дает возможность учитывать ограничения, которые накладываются на привод динамических систем и уменьшить напряженность протекания переходных процессов. Кроме того, появляется возможность проектировать привод динамических систем меньшей мощности.

Одним из преимуществ дополнения классического регулятора элементом типа „насыщение” есть возможность проводить синтез оптимального управления без учета ограничений, наложенных на функцию

управления. Это в значительной степени облегчает расчеты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щербина О.А. Методологические аспекты динамического программирования / Щербина О.А. // Динамические системы. Межведомственный научный сборник. Вып. 22, 2007. – С. 21-36.
2. Колб Ант. А., Колб А.А. Теорія електроприводу: навчальний посібник. – Д.: Національний гірничий університет, 2006. – 511 с.
3. Ловейкін В.С. Комплексний синтез оптимального керування рухом

вантажопідйомного крана / Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О. // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. №45. – 2011. – С. 385–399.

4. Ловейкін В.С. Оптимізація керування рухом одномасових механічних систем / Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О. // Motrol. – Том 12 В. – 2010. – Lublin. – С. 91–96.

5. Арутюнов А.В., Магарил-Ильєв Г.Г., Тихомиров В.М. Принцип максимума Понтрягина. Доказательство и приложения. – М.: Изд-во Факториал Пресс, 2006. – 144 с.

6. Блинов А.О., Фраленко В.П. Многомерная аппроксимация в задачах моделирования и оптимизации // Автоматика и телемеханика, 2009, № 4, – С 98-109.

7. Ловейкін В.С. Дискретний метод синтезу оптимальних керувань технічними системами / Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О. // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – Вип. 107. – Том 2. – 2011. – С. 119–125.

8. Улдаев А. С., Моржин О. В. Улучшение управлений в нелинейных системах на основе краевых задач // Известия Иркутского государственного университета. Математика. – 2009. – 2, № 1. – С. 94–107.

9. Гурман В. И., Квоков В. Н., Ухин М. Ю. Приближенные методы оптимизации управления летательным аппаратом // Автоматика и телемеханика. – 2008. – № 4. – С. 191–201.

10. Репин А.И. Алгоритм оптимальной настройки реальных ПИД регуляторов на заданный запас устойчивости / А.И. Репин, Сабанин В.Р., Смирнов В.И. // Современные методы и алгоритмы систем автоматизации в энергетике. – №4 (9). – 2010. – С. 7–12.

11. Oviedo J.J.E., Boelen T., van Overschee P. Robust advanced PID control (RaPID): PID tuning based on engineering specifications // IEEE Control Systems Magazine. Feb. 2006. Vol. 26. Issue 1. P. 15-19.

12. Li Y., Ang K.H., Chong G.C.Y. Patents, Software, and Hardware for PID control: an overview and analysis of the current art // IEEE Control Systems Magazine. Feb. 2006. – P. 42-54.

13. Васильев В.А. Новые подходы к разработке адаптивного цифрового ПИД-регулятора / Васильев В.А., Воевода А.А., Жмудь В.А. // Сборник научных трудов НГТУ. – 2006. – № 3(45). – С. 11–18.

14. Рогач В.Я. О выборе критериев оптимальности систем управления с учетом случайного характера воздействий / В.Я. Рогач // Промышленные АСУ и контроллеры. – № 9. – 2006. – С. 31–36.

15. Мижидон А.Д. Аналитическое конструирование оптимальных регуляторов при постоянно действующих стохастических возмущениях в приложении к синтезу виброзащитных систем / А. Д. Мижидон // Автоматика и телемеханика. – 2008. – № 4. – С. 81–93.

16. Задорожный В.Н. Высшая математика для технических университетов. Дифференциальные уравнения: учебное пособие / В.Н. Задорожный, В.Ф. Зальмеж, А.Ю. Трифонов, А.В. Шаповалов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – 396 с.

17. Ловейкін В.С. Застосування методів варіаційного числення в задачах оптимального управління вантажопідйомними машинами сільськогосподарського призначення / Ловейкін В.С., Човнюк Ю.В., Ромасевич Ю.О. // Підйомно-транспортна техніка. №2. – 2010. – С. 3–15.

18. Ловейкін В.С. Оптимізація режиму зміни вильоту вантажу баштового крана за одиничними кінематичними критеріями / В.С. Ловейкін, Ю.О. Ромасевич, Г.В. Шумілов // Motrol. – Том 13 В. – 2011. – Lublin. – С. 167–173.

19. Півняк Г.Г., Волков О.В. Сучасні частотно-регульовані асинхронні електроприводи з широтно-імпульсною модуляцією: монографія. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2006. – 470 с. (рос. мовою).

20. Виноградов А. Реализация защиты преобразователя частоты на основе динамической тепловой модели IGBT-модуля / А. Виноградов, А. Сибирцев, И. Колонин // Силовая электроника. – № 2. – 2006. – С. 50–55.

IMPLEMENTATION OF OPTIMUM
CONTROL BY DRIVING
OF DYNAMIC SYSTEMS WITH USE
PD - AND PID-REGULATIONS

Summary. Recommendations concerning implementation of optimum control in form of feedback are resulted. For traffic control of dynamic systems it is offered to use quasioptimum governor with addition in form of nonlinear function of type "saturation".

Key words: optimum control, quasioptimum governor, feedback.