

А. К. Гришко, А. В. Лысенко, С. А. Моисеев

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В МАСШТАБЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ¹

A. K. Grishko, A. V. Lysenko, S. A. Moiseev

PREDICTION AND OPTIMIZATION OF PROCESSES OF DESIGN MANAGEMENT OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS IN REAL TIME

Аннотация. *Актуальность и цели.* Проектирование высокотехнологичных изделий часто рассматривается как многокритериальный синтез сложной системы, когда одновременное улучшение всех показателей качества системы невозможно, а сами критерии проектирования, как правило, носят взаимоисключающий характер. Кроме того, все реальные проблемы управления подчинены различного типа ограничениям, которые являются неизбежной частью формулировки общей проблемы, потому что система работает вблизи них. Комплексные задачи анализа проектируемых конструкций на соответствие техническим требованиям, как правило, решаются на его завершающих этапах. Поэтому важно на ранних этапах проектирования для принятия оптимального конструкторского решения иметь возможность прогнозировать поведение сложной системы и одновременно учитывать возникающие в его процессе ограничения. Это позволит сократить и временные затраты на разработку сложных технических систем. Цель работы состоит в том, чтобы предложить способ оптимизации управления процессами проектирования сложных технических систем. *Материалы и методы.* В статье рассматривается алгоритм управления, основанный на применении теории оптимального управления с использованием подхода с расширяющимися условиями. *Результаты.* В работе описана процедура оптимизации управления, отличительной особенностью которой является то, что в результате ее применения будет формироваться закон управления, имеющий стационарную обратную связь, а также характеризующийся системным учетом всех ограничений на реализацию сложной системы. *Выводы.* Предложенный алгоритм прогнозирующего управления найдет широкое применение в системах управления, работающих на границах рабочих режимов. Основными достоинствами алгоритма являются возможность производить оценку состояния системы в масштабе реального времени и прогнозирование

Abstract. *Background.* Designing high-tech products is often seen as a multicriteria synthesis of a complex system, when simultaneous improvement of all indicators of the quality of the system is impossible, and the design criteria themselves are usually mutually exclusive. In addition, all real management problems are subject to various types of constraints, which are an inevitable part of the formulation of a common problem because the system works near them. Complex tasks of the analysis of the projected designs on compliance to technical requirements, as a rule, are solved at its final stages. Therefore, it is important to be able to predict the behavior of a complex system and at the same time take into account the constraints arising in its process in the early stages of design to make an optimal structural decision. This will reduce the time spent on the development of complex technical systems. The aim of the work is to offer a way to optimize the management of complex technical systems design processes. *Materials and methods.* The article deals with the control algorithm based on the application of the optimal control theory using an approach with expanding conditions. *Results.* The paper describes the procedure of control optimization, a distinctive feature of which is that as a result of its application will be formed the control law, which has a stationary feedback, as well as characterized by a systematic account of all restrictions on the implementation of a complex system. *Conclusions.* The proposed predictive control algorithm will be widely used in control systems operating at the boundaries of operating modes. The main advantages of the algorithm are the ability to assess the state of the system in real time and predict future States, as well as the ability to optimize in real time the future trajectory of the control system subject to restrictions.

¹ Статья подготовлена в рамках реализации проекта «Адаптивная интеллектуальная система вибрационных испытаний бортовой радиоэлектронной аппаратуры ракетно-космической и авиационной техники нового поколения на основе многофункциональной цифровой генерации испытательных сигналов» (Соглашение № 17-79-10281 от 24.07.2017) при финансовой поддержке Российского научного фонда.

будущих состояний, а также возможность оптимизации в масштабе реального времени будущей траектории системы управления, подчиненной ограничениям.

Ключевые слова: сложная техническая система, прогнозирующее управление, ограничения проектирования.

Key words: complex technical system, predictive control, design constraints.

Введение

Проектирование высокотехнологичных изделий по множеству критериев и показателей качества, имеющих разную природу и не допускающих их одновременное улучшение, актуальная проблема, решение которой построено на компромиссах и ограничениях. Внешняя среда также подчинена различного типа ограничениям, которые являются неизбежной частью формулировки общей проблемы, потому что система работает вблизи них.

Необходимость в прогнозирующем управлении и его оптимизации возникла в промышленной сфере как реакция на необходимость учитывать возникающие реальные ограничения. В большинстве задач проектирования эти ограничения можно игнорировать по меньшей мере на начальных стадиях проектирования [1–4]. Но существуют задачи, где эти ограничения будут неизбежной частью формализованного представления общей проблемы. Как правило, это достаточно широкий класс систем, которые функционируют вблизи этих ограничений.

Постановка задачи

Предположим, что имеется стационарная модель некоторой системы, цели и ограничения которой также стационарны, а все состояние системы измеряется. Тогда стратегия управления может быть выражена как определенное отображение статического состояния на управление

$$u_x^0(k) = h(x(k)), \quad (1)$$

где $u_x^0(k)$ – оптимальное управляющее воздействие в момент времени k ; $h(x(k))$ – некоторое статическое отображение состояния системы.

Необходимо охарактеризовать это статическое отображение.

Существует множество альтернативных вариантов формализации моделей прогнозирующего управления, в том числе методы с использованием полиномов и описанием в пространстве состояний [5, 6]. В работе рассматривается метод, описывающий модель управления в пространстве состояний.

Прогнозирующим управлением мы называем алгоритм управления, который основан на решении задачи его оптимизации в масштабе реального времени [7, 8]. Для этого применяется подход, основанный на расширяющихся условиях. Его реализация может быть получена в результате следующих этапов:

1. Для текущего состояния системы $x(k)$ и времени k новое необходимо найти решение в масштабе реального времени для разомкнутого контура задачи оптимального управления для некоторого будущего интервала. При этом учитываются *текущие* и *будущие* ограничения.
2. После этого применяется первый шаг для последовательности оптимального управления.
3. Повторяется процедура для момента времени $(k + 1)$ с использованием текущего состояния $(k + 1)$.

В конечном итоге реализуется стратегия замкнутого контура, для чего используется измеренная величина $x(k)$ как текущее состояние. В тех случаях, когда непосредственное измерение $x(k)$ нельзя произвести, то стратегию замкнутого контура получают $x(k)$ на восстановленную величину, которая получена как некоторая форма наблюдателя.

Моделирование прогнозирующего управления для общего нелинейного варианта

Будем предполагать, что величину $x(k)$ можно непосредственно измерить. Тогда для общего нелинейного варианта метод будет выглядеть следующим образом.

Дана некоторая модель

$$x(l+1) = f(x(l), u(l)), \quad x(k) = x, \tag{2}$$

где новое состояние модели $x(l+1)$ является некоторой функцией от предыдущего состояния $x(l)$ и результата управляющего воздействия $u(l)$ в момент времени l .

Модельное прогнозирующее управление для (x, k) находим решением задачи в виде ограниченного оптимального управления [6, 7, 9]:

$$P_N(x): V_N^0(x) = \min_{u \in U_N} V_N(x, U), \tag{3}$$

где

$$U = \{u(k), u(k+1), \dots, u(k+N-1)\}; \tag{4}$$

$$V_N(x, U) = \sum_{l=k}^{k+N-1} L(x(l), u(l)) + F(x(k+N)), \tag{5}$$

где слагаемое $F(x(k+N))$ характеризует зависимость от граничных условий.

V_N – подмножество U , которое будет удовлетворять ограничениям на всем рассматриваемом интервале $[k, \text{первый } k+N-1]$:

$$u(l) \in U, \quad l = k, k+1, \dots, k+N-1; \tag{6}$$

$$x(l) \in U, \quad l = k, k+1, \dots, k+N, \tag{7}$$

вместе с некоторым граничным условием в виде

$$x(k+N) \in W.$$

Как правило, множество $X \in R^m$ имеет выпуклый и компактный характер, множество $X \in R^n$ является выпуклым и замкнутым, а W – это множество, которое может быть соответствующим образом выбрано для достижения устойчивости системы управления.

Поскольку вышеупомянутая формулировка модели носит инвариантный характер во времени, то в результате будет получаться закон управления, имеющий стационарную обратную связь [4–6]. Без потери общности можно задать $k = 0$ в задаче управления, имеющей разомкнутый контур, для чего (x, k) решают

$$P_N(x): V_N^0(x) = \min_{u \in U_N} V_N(x, U), \tag{8}$$

где

$$U = \{u(0), u(1), \dots, u(k+N-1)\}; \tag{9}$$

$$V_N(x, U) = \sum_{l=0}^{N-1} L(x(l), u(l)) + F(x(N)) \tag{10}$$

при соответствующих ограничениях.

Формирование алгоритма оптимизации управления с учетом ограничений

С целью решения этой задачи можно использовать стандартные и типовые методы оптимизации.

Пусть некоторая управляющая последовательность, которую требуется минимизировать, имеет следующий вид:

$$U_x^0 = \{u_x^0(0), u_x^0(1), \dots, u_x^0(N-1)\}. \tag{11}$$

Фактическое управление, которое прикладывается в момент времени k , – это первый элемент этой последовательности, т.е.

$$u = u_x^0(0). \quad (12)$$

После этого время смещаем вперед на единицу и вышеупомянутую процедуру повторяем для следующего диапазона оптимизации на N шагов вперед. Это значит, что первый вход новой последовательности из N шагов вперед будет использоваться в качестве управления. Вышеупомянутую процедуру можно повторять неограниченное количество раз. Идея иллюстрируется в публикациях [7–10] и на рис. 1–3.

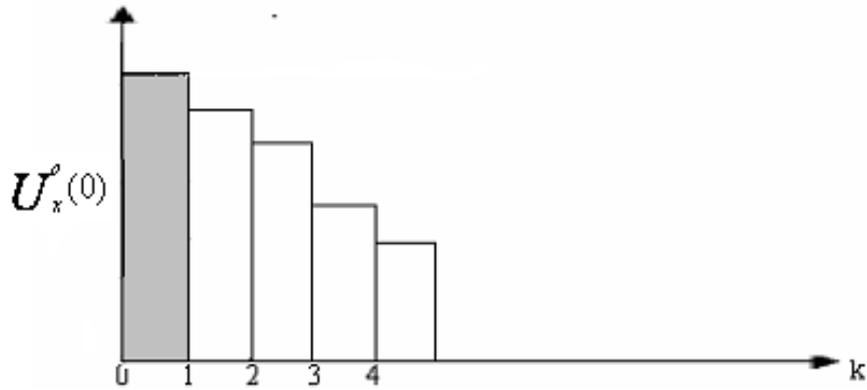


Рис. 1. Первый этап оптимизации управления

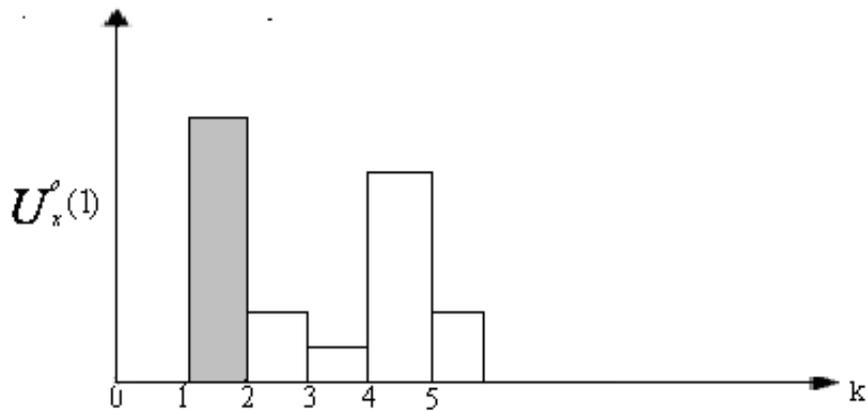


Рис. 2. Второй этап оптимизации управления

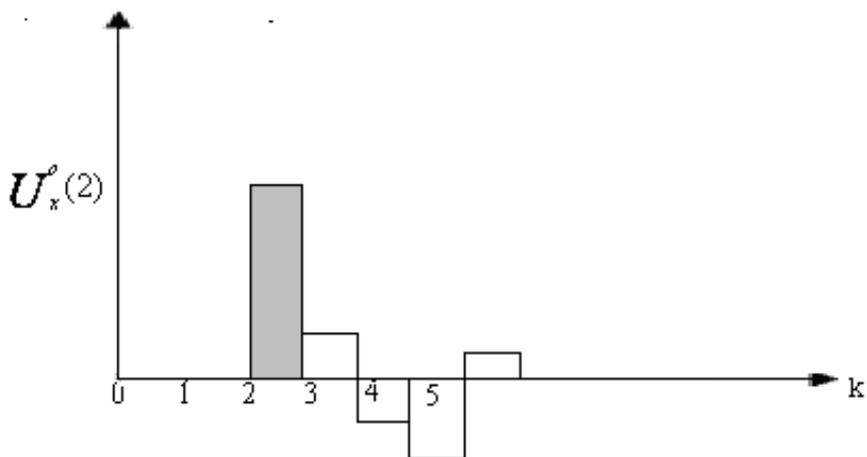


Рис. 3. Третий этап оптимизации управления

Прогнозирующее управление, которое было выше упомянуто, в неявной форме определяет стационарную стратегию управления, как в выражении (1), т.е. статическое отображение вида

$$h(x) = u_x^0(0). \quad (13)$$

Заключение

Предложенный алгоритм прогнозирующего управления находит широкое применение в системах управления, работающих на границах рабочих областей [11–15].

Основными достоинствами алгоритма являются следующие:

- алгоритм прогнозирующего управления обеспечивает системный подход к учету ограничений в задачах управления;
- этот метод является одним из немногих, позволяющих работать с ограничениями состояния;
- метод обладает глобальной асимптотической устойчивостью при подходящих весовых коэффициентах заключительного состояния;
- имеется возможность произвести оценку состояния в масштабе реального времени и прогнозирование будущих состояний;
- имеется возможность оптимизации в масштабе реального времени будущей траектории системы управления, подчиненной ограничениям, с помощью метода квадратичного программирования.

Библиографический список

1. Методы классической и современной теории автоматического управления : учебник : в 3 т. / под ред. Н. Д. Егупова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – Т. 2: Синтез регуляторов и теория оптимизации систем автоматического управления. – 736 с.
2. Гилл, Ф. Практическая оптимизация / Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райт. – М. : Мир, 1985. – 509 с.
3. Гришко, А. К. Выбор оптимальной стратегии управления надежностью и риском на этапах жизненного цикла сложной системы / А. К. Гришко // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 2 (18). – С. 26–31. DOI: 10.21685/2307-4205-2017-2-4.
4. Гришко, А. К. Оптимальное управление параметрами системы радиоэлектронных средств на основе анализа динамики состояний в условиях конфликта / А. К. Гришко // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 2 (38). – С. 102–111. DOI: 10.21685/2072-3059-2016-2-9.
5. Гришко, А. К. Анализ надежности сложной системы на основе динамики вероятности отказов подсистем и девиации параметров / А. К. Гришко // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2016. – № 6 (34). – С. 116–121.
6. Гришко, А. К. Оптимальное управление частотным ресурсом радиотехнических систем на основе вероятностного анализа динамики информационного конфликта / А. К. Гришко // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2016. – № 57. – С. 21–28. DOI: 10.21667/1995-4565-2016-57-3-21-28.
7. Гришко, А. К. Алгоритм оптимального управления в сложных технических системах с учетом ограничений / А. К. Гришко // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2017. – № 1 (21). – С. 117–123.
8. Гришко, А. К. Алгоритм поддержки принятия решений в многокритериальных задачах оптимального выбора / А. К. Гришко // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2016. – № 1 (17). – С. 265–271.
9. Гришко, А. К. Анализ надежности структурных элементов сложной системы с учетом интенсивности отказов и параметрической девиации / А. К. Гришко // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2016. – № 3 (19). – С. 130–137.
10. Гришко, А. К. Управление электромагнитной устойчивостью радиоэлектронных систем на основе вероятностного анализа динамики информационного конфликта / А. К. Гришко, А. С. Жумабаева, Н. К. Юрков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 4 (18). – С. 66–75.
11. Grishko, A. Parameter control of radio-electronic systems based of analysis of information conflict / А. К. Гришко // 2016 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE) (Novosibirsk, Russia, October 03–06, 2016). – Novosibirsk, 2016. – Vol. 02. – P. 107–111. DOI: 10.1109/APEIE.2016.7806423.
12. Grishko, A. Structural and Parameter Optimization of the System of Interconnected Processes of Building Complex Radio-Electronic Devices / A. Grishko, I. Kochegarov, N. Yurkov // 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM) (Polyana, Svalyava, Ukraine, February 21–25, 2017). – Polyana, Svalyava, 2017. – P. 192–194. DOI: 10.1109/CADSM.2017.7916112.

13. *Grishko, A.* Dynamic Analysis and Optimization of Parameter Control in Radio Systems in Conditions of Interference / A. Grishko, N. Goryachev, I. Kochegarov, N. Yurkov // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) (Moscow, Russia, May 12–14, 2016). – Moscow, 2016. – P. 1–4. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491674.
14. *Grishko, A. K.* Multi-criteria Optimization of the Structure of Radio-electronic System in Indeterminate Conditions / A. K. Grishko, I. I. Kochegarov, N. V. Goryachev // XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM) (Saint Petersburg, Russia, May 24–26, 2017). – Saint Petersburg, 2017. – P. 210–212. DOI: 10.1109/SCM.2017.7970540.
15. *Grishko, A.* Adaptive Control of Functional Elements of Complex Radio Electronic Systems / A. Grishko, N. Goryachev, N. Yurkov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, № 23. – P. 43842–43845.

Гришко Алексей Константинович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alexey-grishko@rambler.ru

Лысенко Алексей Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования и производства
радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: lysenko_av@bk.ru

Моисеев Сергей Александрович

аспирант,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kipra@pnzgu.ru

Grishko Aleksey Konstantinovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Lysenko Aleksey Vladimirovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Moiseyev Sergey Aleksandrovich

postgraduate student,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 519.7; 681.5

Гришко, А. К.

Прогнозирование и оптимизация управления процессов проектирования сложных технических систем в масштабе реального времени / А. К. Гришко, А. В. Лысенко, С. А. Моисеев // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 1 (21). – С. 40–45. DOI 10.21685/2307-4205-2018-1-5.