

В. Р. БАРСЕГЯН

УПРАВЛЕНИЕ СОСТАВНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ



В. Р. БАРСЕГЯН

**УПРАВЛЕНИЕ
СОСТАВНЫХ
ДИНАМИЧЕСКИХ
СИСТЕМ
и систем
с многоточечными
промежуточными
условиями**



МОСКВА НАУКА 2016

УДК 62-50
ББК 34.41
Б26

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор *В.Ю. Рутковский*,
доктор физико-математических наук, профессор *А.Н. Квитко*

Барсегян В.Р.

Управление составных динамических систем и систем с многоточечными промежуточными условиями / В.Р. Барсегян. – М. : Наука, 2016. – 230 с. – ISBN 978-5-02-039961-7.

Монография посвящена проблемам управления составных линейных динамических систем и систем с многоточечными промежуточными условиями. Особое внимание уделено необходимым и достаточным условиям вполне управляемости и наблюдаемости составных линейных систем, которые в стационарном случае по завершенности сравнимы с условиями Калмана. Выявлены качественные свойства управляемости и наблюдаемости составных систем. Предложены конструктивные методы решения задач управления составных систем, систем с неразделенными многоточечными промежуточными условиями, с ограничениями на значения разных частей координат фазового вектора в промежуточные моменты времени. В качестве приложений для конкретных составных систем и систем с многоточечными промежуточными условиями построены явные решения задачи управления, оптимального управления и стабилизации.

Для специалистов прикладной математики и теоретической механики, занимающихся теорией управления и наблюдения, математическим моделированием, системным анализом и их приложениями, а также аспирантов и студентов вузов, специализирующихся в этих областях.

ISBN 978-5-02-039961-7

© Барсегян В.Р., 2016

© ФГУП Издательство «Наука»,
редакционно-издательское
оформление, 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	6
Введение	8
Глава 1. Управляемость и наблюдаемость составных линейных динамических систем	16
1.1. Управляемая составная линейная нестационарная система и ее движение	17
1.1.1. Построение движения составной системы	19
1.2. Поэтапно меняющаяся линейная управляемая система	25
1.2.1. Построение движения поэтапно меняющейся системы	26
1.3. Приведение нелинейных управляемых систем к поэтапно меняющимся линейным системам методом кусочно-линейной аппроксимации.....	29
1.4. Условие вполне управляемости составных линейных систем	33
1.4.1. Условие вполне управляемости составных линейных нестационарных систем	35
1.4.2. Условие вполне управляемости составных линейных стационарных систем.....	37
1.5. Условие вполне наблюдаемости составных линейных систем	51
1.5.1. Условие вполне наблюдаемости составных линейных нестационарных систем	51
1.5.2. Условие вполне наблюдаемости составных линейных стационарных систем.....	58
1.6. Условие вполне наблюдаемости поэтапно меняющихся линейных систем	67
1.6.1. Условие вполне наблюдаемости поэтапно меняющихся линейных нестационарных систем	67
1.6.2. Условие вполне наблюдаемости поэтапно меняющихся линейных стационарных систем.....	73

1.7. Условие управляемости составной линейной стационарной системы в задаче с подвижными концами.....	82
1.7.1. Условие управляемости поэтапно меняющейся линейной стационарной системы в задаче с подвижными концами	87
1.8. Принцип двойственности	94
1.9. Условия вполне управляемости и наблюдаемости в примерах составных систем.....	95
1.10. Эквивалентные управляемые составные линейные нестационарные системы.....	101
1.11. Влияние невырожденного преобразования на свойства управляемости и наблюдаемости составной линейной стационарной системы и вычисление матрицы преобразования....	106
1.11.1. Влияние невырожденного преобразования на свойства управляемости составной линейной стационарной системы.....	107
1.11.2. Влияние невырожденного преобразования на свойства наблюдаемости составной линейной стационарной системы.....	110
1.11.3. Вычисление матрицы невырожденного преобразования для поэтапно меняющейся линейной стационарной системы.....	113
Глава 2. Задачи управления и оптимальной стабилизации составных линейных динамических систем.....	115
2.1. Задачи управления и оптимального управления составной линейной нестационарной системы	115
2.2. Решение задач управления и оптимального управления составной системы, состоящей из трех линейных нестационарных подсистем	119
2.3. Задача управления поэтапно меняющихся линейных динамических систем.....	127
2.4. Решения исследованных задач управления и оптимального управления для конкретных систем.....	131
2.4.1. Управление одной составной системы, образованной не вполне управляемыми подсистемами и со сменой фазового пространства.....	131
2.4.2. Пример задачи управления поэтапно меняющейся системы.....	140

2.4.3. Оптимальное управление нагрева жидкости в тепловом аппарате	146
2.5. Оптимальная стабилизация управляемых составных линейных нестационарных систем	151
2.5.1. Задача оптимальной стабилизации нагрева жидкости в тепловом аппарате.....	159
Глава 3. Задачи управления линейных динамических систем с многоточечными промежуточными условиями	165
3.1. Управление линейных динамических систем с неразделенными многоточечными промежуточными условиями	165
3.1.1. Управление материальной точки, движущейся в вертикальной плоскости под действием реактивной силы и силы тяжести.....	170
3.1.2. Пример задачи оптимального управления с неразделенными промежуточными условиями.....	179
3.2. Управление поэтапно меняющейся линейной динамической системы с неразделенными многоточечными промежуточными условиями	182
3.2.1. Управление нагрева жидкости в тепловом аппарате ...	188
3.3. Управление линейных динамических систем с ограничениями на значения частей координат фазового вектора в промежуточные моменты времени	196
3.3.1. Примеры задач управления и оптимального управления	202
3.4. Управление поэтапно меняющихся линейных динамических систем с ограничениями на значения частей координат фазового вектора в промежуточные моменты времени	206
3.4.1. Пример задачи управления.....	215
Заключение	220
Литература.....	221

105. Сансоне Дж. Обыкновенные дифференциальные уравнения. Т. 2. М.: ИЛ, 1954.
106. Симонян С. О., Аветисян А. Г. Прямой метод решения линейных многоточечных краевых задач // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2002. Т. LV, № 1. С. 95–103.
107. Точилин П. А., Куржанский А. Б. Задачи достижимости и синтеза управлений для гибридных систем. М.: МГУ, 2008. 176 с.
108. Черноуцько Ф. Л. Оценивание фазового состояния динамических систем. М.: Наука, 1988. 320 с.
109. Щенникова Е. В., Дружинина О. В., Мулкиджан А. С. Об оптимальной стабилизации многосвязных управляемых систем // Труды Института системного анализа Российской академии наук. Динамика неоднородных систем. 2010. Т. 53(3). С. 99–102.
110. Barseghyan V. R. Control of stage by stage changing linear dynamic systems // Yugoslav Journal of Operations Research. 2012. Vol. 22, № 1. P. 31–39.
111. Bemporad A., Ferrari-Trecate G., Morari M. Observability and controllability of piecewise affine and hybrid systems // IEEE Trans. Automat. Contr. 2000. Vol. 45(10). P. 1864–1876.
112. Borrelli F., Baotic M., Bemporad A., Morreri M. Dynamic programming for constrained optimal control of discrete-time linear hibrid systems // Elsevier, Automatica. 2005. Vol. 41. P. 1709–1721.
113. Cassandras C. G., Pepyne D. L., Wardi Y. Optimal control of a class of hybrid systems // IEEE Trans. Automat. Contr. 2001. Vol. 46(3). P. 398–415.
114. Dengguo Xu. Controllability and Observability of a Class of Piecewise Linear Impulsive Control Systems // Advances in Computer, Communication, Control and Automation. LNEE. 2012. Vol. 121. P. 321–328.
115. Egerstedt M., Babaali M. On observability and reachability in a class of discrete-time switched linear systems // Proc. 2005 American Control Conf. 2005. P. 1179–1180.
116. Fang, Sun. Controllability and observability of complex $[r]$ -matrix time-varying impulsive systems // Advances in Difference Equations. 2013. Vol. 129. P. 1–16.
117. Hihi H. Structural Observability of Controlled Switching Linear Systems // International Journal of Control Science and Engineering. 2012. Vol. 2(5). P. 127–135.
118. Hong Shi, Guangming Xie. Controllability and Observability Criteria for Linear Piecewise Constant Impulsive Systems // Journal of Applied Mathematics. 2012. Article ID 182040. 24 p.

119. *Johansson M.* Piecewise Linear Control Systems. Springer, 2003. 220 p.
120. *Sun A., Ge S.S., Lee T.H.* Controllability and reachability criteria for switched linear systems // *Automatica*. 2002. Vol. 38. P. 775–786.
121. *Xie G., Zheng D.* Research on controllability and reachability of hybrid systems // *Proc. Chinese Control Conf.* 2000. P. 114–117.
122. *Xie G., Zheng D., Wang L.* Controllability of switched linear systems // *I3E Transactions on Automat. Contr.* 2002. Vol. 47(8). P. 1401–1405.
123. *Xie G., Wang L.* Necessary and sufficient conditions for controllability of switched linear systems // *Proc. Amer. Control Conf.* 2002. P. 1897–1902.
124. *Xie G., Wang L.* Necessary and sufficient conditions for controllability and observability of switched impulsive control systems // *IEEE Trans. Autom. Control*. 2004. Vol. 49. P. 960–966.
125. *Vidal R., Chiuso A., Soatto S., Sastry S.* Observability of linear hybrid systems, ser. Hybrid Systems: Computation and Control. Springer-Verlag, 2003.

Научное издание

Ваня Рафаелович Барсегян

УПРАВЛЕНИЕ
СОСТАВНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ
И СИСТЕМ С МНОГОТОЧЕЧНЫМИ
ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ

Редактор *Е.Ю. Федорова*

Художник *В.Ю. Яковлев*

Корректоры *А.Б. Васильев, Т.А. Печко,*

Т.И. Шеповалова

Верстка *Е. Сабеевой*

Подписано к печати 06.09.2016

Формат 60 × 90^{1/16}. Гарнитура Таймс

Печать офсетная

Усл.печ.л. 14,5. Усл.кр.-отт. 15,0. Уч.-изд.л. 13,0

Тираж 300 экз. Тип. зак.

ФГУП Издательство «Наука»

117997, Москва, Профсоюзная ул., 90

E-mail: secret@naukaran.com

www.naukaran.com

ФГУП Издательство «Наука»

(Типография «Наука»)

121099, Москва, Шубинский пер., 6

ISBN 978-5-02-039961-7



9 785020 399617 >

Научное издание

Ваня Рафаелович Барсегян

УПРАВЛЕНИЕ
СОСТАВНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ
И СИСТЕМ С МНОГОТОЧЕЧНЫМИ
ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ

Редактор *Е.Ю. Федорова*

Художник *В.Ю. Яковлев*

Корректоры *А.Б. Васильев, Т.А. Печко,*

Т.И. Шеповалова

Верстка *Е. Сабеевой*

Подписано к печати 06.09.2016

Формат 60 × 90^{1/16}. Гарнитура Таймс

Печать офсетная

Усл.печ.л. 14,5. Усл.кр.-отт. 15,0. Уч.-изд.л. 13,0

Тип. зак.

ФГУП Издательство «Наука»

117997, Москва, Профсоюзная ул., 90

E-mail: secret@naukaran.com

www.naukaran.com

ФГУП Издательство «Наука»

(Типография «Наука»)

121099, Москва, Шубинский пер., 6