

Оптимизация, системный анализ и исследование операций

© 2022 г. В.А. БУХАЛЁВ, д-р техн. наук (Vadim.Bukhalev@yandex.ru)
(Московский научно-исследовательский телевизионный институт),
А.А. СКРЫННИКОВ, канд. техн. наук (a1260@mail.ru)
(Государственный научно-исследовательский институт
авиационных систем, Москва;
Московский авиационный институт),
В.А. БОЛДИНОВ, канд. техн. наук (ViktorBoldinov@mail.ru)
(Московский авиационный институт)

ИГРОВОЕ МИНИМАКСНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПОЛОСОЙ ПРОПУСКАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ¹

Рассматривается задача отыскания алгоритмов управления полосой пропускания автоматической системы в игровой постановке, когда один из игроков (основная система управления) старается улучшить качество переходных процессов, а другой (система информационного противодействия) — ухудшить. Получены приближенно-оптимальные минимаксный и максиминный информационно-управляющие алгоритмы игроков. Приведен пример, иллюстрирующий работу алгоритма.

Ключевые слова: игровое управление, минимакс, максимин, случайная скачкообразная структура, марковская цепь, седловая точка игры.

DOI: 10.31857/S0005231022020106

1. Введение

Выходной сигнал системы автоматического управления, находящейся под воздействием сильных возмущений и помех, может изменяться в значительном диапазоне, превосходящем пределы, установленные техническими требованиями. Если система содержит информационно-управляющий алгоритм, который может регулировать ее полосу пропускания в ответ на выбросы амплитуды возмущений и помех, то можно достичь удержания выходного сигнала системы в заданных пределах.

Однако положение ухудшается, если система работает в условиях информационного противодействия, стремящегося нарушить нормальное функционирование системы также путем регулирования ее полосы пропускания.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты №№ 19-08-00502, 19-08-00487) и Российского научного фонда (проект № 22-29-00708).

Для построения оптимального информационно-управляющего алгоритма в этих условиях целесообразно применить теорию дифференциальных игр и теорию систем со случайной скачкообразной структурой (ССС), что и составляет содержание задачи, рассматриваемой в настоящей статье.

Теория дифференциальных игр была создана Р. Айзексом [1] примерно в одно время с теорией управления и независимо от нее. Теория случайных процессов в системах автоматического управления была разработана В.С. Пугачёвым [2], а основные принципы и методы современной теории оптимального стохастического управления — в монографиях А.А. Фельдбаума [3] и М. Аоки [4], а также представлены в ряде других фундаментальных научных трудов, в частности в монографиях А.Е. Брайсона, Хо Ю Ши [5] и Дж.Н. Саридиса [6].

Характерной особенностью функционирования автоматических систем в условиях информационного противодействия является резкое внезапное скрытое изменение их структуры (т.е. состава элементов системы и связей между ними).

Для исследования таких систем целесообразно применять математические модели, основанные на теории систем со случайной скачкообразной структурой (ССС).

Игровой подход к оптимизации управления обычно используется там, где одним и тем же объектом управляют две стороны (противники, конкуренты, игроки), преследующие строго противоположные цели. Оптимизируя свои стратегии управления, один — по минимаксному, другой — по максиминному критериям, в антагонистической игре с нулевой суммой и седловой точкой, игроки ориентируются на самую неблагоприятную для себя стратегию противника с целью обеспечить гарантированный результат, хуже которого нельзя ожидать ни при какой стратегии соперника [1, 8–15].

В [9–12] были получены оптимальные и приближенно-оптимальные, основанные на методе двухмоментной параметрической аппроксимации вероятностных распределений [10–12], игровые минимаксные информационно-управляющие алгоритмы для следующих классов систем:

- в чистых и смешанных стратегиях;
- непрерывные и дискретные;
- линейные и нелинейные;
- с марковской и условно-марковской случайной скачкообразной структурой, включающей в себя: 1) структуру, зависящую от фазовых координат; 2) полумарковскую структуру; 3) структуру со случайными вероятностями переходов из одного состояния в другое; 4) структуру с неизвестными вероятностями переходов; 5) структуру с состояниями, наблюдаемыми с помощью индикаторов структуры, показания которых подвергаются ошибкам типа “ложная тревога” и “пропуск сигнала”.

Некоторые частные случаи перечисленных задач рассматривались, например, в [14, 15] (дифференциальная игра в линейной системе с марковской случайной структурой), в [16] (линейные системы со случайной скачкообразной

структурой) и в [17] (устойчивость нелинейных систем со случайной структурой).

2. Постановка задачи

Дано:

- объект управления

$$(1) \quad \begin{aligned} \dot{x}(t) &= a(-x(t) + u(t) + v(t) + \xi(s, t)), \\ M[x(0)] &= 0, \quad M[(x(0))^2] = R(0); \end{aligned}$$

- измерители

$$(2) \quad z(t) = x(t) + \zeta_u(t),$$

$$(3) \quad y(t) = x(t) + \zeta_v(t);$$

- показатель качества

$$(4) \quad J = M \left[\int_0^{t_n} (\alpha x^2(t) + \beta(s)u^2(t) - \gamma(s)v^2(t))dt \right];$$

- критерии оптимальности

$$(5) \quad J_u = \min_{u_{0,t_n}} \max_{v_{0,t_n}} J,$$

$$(6) \quad J_v = \max_{v_{0,t_n}} \min_{u_{0,t_n}} J,$$

где $x(t)$ – выходной сигнал объекта управления; $u(t)$, $v(t)$ – управляющие сигналы игроков U и V соответственно; $z(t)$, $y(t)$ – выходные сигналы измерителей игроков U и V соответственно; $\xi(s, t)$, $\zeta_u(t)$, $\zeta_v(t)$ – центрированные гауссовские белые шумы с интенсивностями $G(s)$, Q_u , Q_v соответственно; t и t_n – текущий и конечный моменты времени управления; $s(t)$ – индекс структуры, $s = 1, 2$ – условно-марковская цепь с интенсивностями переходов $q_{ij}(\hat{x}_u(t), \hat{x}_v(t), t)$ из состояния $s(t) = j$ в состояние $s(t) = i$, $i \neq j$:

$$q_{21}(\hat{x}_u(t)) \triangleq h(\hat{x}_u(t)), \quad q_{12}(\hat{x}_v(t)) \triangleq g(\hat{x}_v(t)) :$$

$$(7) \quad h(\hat{x}_u(t)) = \begin{cases} h_{\max} & \text{при } |\hat{x}_u(t)| \leq \Delta; \\ h_{\min} & \text{при } |\hat{x}_u(t)| > \Delta; \end{cases}$$

$$(8) \quad g(\hat{x}_v(t)) = \begin{cases} g_{\min} & \text{при } |\hat{x}_v(t)| \leq \Delta; \\ g_{\max} & \text{при } |\hat{x}_v(t)| > \Delta, \end{cases}$$

где $\hat{x}_u(t) \triangleq M[x(t)|z_{o,t}]$, $\hat{x}_v(t) \triangleq M[x(t)|y_{o,t}]$ – оптимальные оценки $x(t)$, основанные на измерениях $z_{o,t}$ и $y_{o,t}$ на отрезке $[0, t]$.

Как видно из формул (7), (8), переход из $s = 1$ в $s = 2$ зависит от $\hat{x}_u(t)$, т.е. управляется игроком U , а переход из $s = 2$ в $s = 1$ зависит от $\hat{x}_v(t)$, т.е. управляется игроком V .

В формулах (1)–(8) a , α , $\beta(1)$, $\beta(2)$, $\gamma(1)$, $\gamma(2)$, $G(1)$, $G(2)$, Q_u , Q_v , $h_{\max}$, $h_{\min}$, $g_{\max}$, $g_{\min}$, Δ – положительные константы;

$$(9) \quad \begin{aligned} \beta(1) \ll \beta(2), \quad \gamma(1) \gg \gamma(2), \quad \gamma(1), \gamma(2) \gg \beta(1), \beta(2), \\ G(1) < G(2), \quad \alpha > \gamma(1). \end{aligned}$$

Требуется найти: оптимальные управления игроков $u^*(t)$, $v^*(t)$ по критериям (5), (6), детерминированно зависящие от $\overline{z_{0,t}}$, $\overline{y_{0,t}}$ в области $u(t)$, $v(t) \in (-\infty, \infty)$, т.е. управления, не ограниченные по абсолютной величине.

3. Содержательный смысл задачи

Показатель качества (4) представляет собой линейную комбинацию трех частных показателей. Первый из них в сочетании с критериями оптимальности (5), (6) характеризует основные цели управления противников: одного — минимизировать средний квадрат выходного сигнала $x(t)$, другого — его максимизировать. При этом каждый из них строит свою стратегию в предположении, что его противник также выбирает наилучшую для себя стратегию. Второй и третий частные показатели отражают энергетические затраты игроков по управлениям $u(t)$ и $v(t)$ в процессе достижения поставленной цели.

В теории автоматического управления шириной полосы пропускания автоматической системы обычно принято называть величину диапазона спектра частот, в котором ослабление средней мощности гармонического или случайного входного сигнала не превышает значений, заданных техническими требованиями. Ширина полосы пропускания регулируется параметрами системы, которые в рассматриваемой задаче управляются сигналами $u(t)$ и $v(t)$ в соответствии с критериями (4), (5).

4. Решение

Как показано в [10–12] для линейной системы ССС, каждый из информационно-управляющих алгоритмов противоборствующих сторон — игроков U и V — состоит из двух взаимосвязанных блоков: блок обработки информации и блок управления. Блок обработки информации в свою очередь состоит из следующих взаимосвязанных блоков: классификатор структуры, идентификатор структуры, фильтр и дисперсиометр. Блок управления состоит из двух блоков: регулятор полосы пропускания и блок параметров регулятора.

Информационно-управляющие алгоритмы делятся на две категории: оптимальные и приближенно-оптимальные. При выборе алгоритма необходимо учитывать следующие обстоятельства.

1. Точность вычислений должна соответствовать точности и достоверности используемой априорной и апостериорной информации, особенно в усло-

виях противодействия, например при постановке помех системам связи и управления автоматических систем.

2. Специфической особенностью оптимальных алгоритмов в системах ССС является многоканальность. Число информационных каналов равно числу состояний случайной структуры. В каждом канале фильтра (в рассматриваемой задаче их два) вычисляется условная оценка $\hat{x}_u(s(t)) \triangleq M[x(t)|s(t), z_{0,t}]$ при фиксированном $s(t)$ и наблюдениях $z_{0,t}$, $s = 1, 2$. Аналогично в каждом из двух каналов дисперсиометра вычисляются условные дисперсии $R(s(t)) \triangleq M[(x(t) - \hat{x}_u(s(t)))^2|s(t), z_{0,t}]$, $s = 1, 2$. Безусловные оценки и дисперсии рассчитываются по формулам

$$\hat{x}_u(t) = \sum_{s=1}^2 p_u(s(t), t) \hat{x}_u(s(t), t),$$

$$R_u(t) = \sum_{s=1}^2 p_u(s(t), t) [R_u(s(t), t) + \hat{x}_u^2(s(t), t)] - \hat{x}_u^2(t).$$

3. Другим серьезным недостатком оптимальных алгоритмов в системах ССС является стохастическая двухточечная краевая задача (СДКЗ). Она возникает вследствие того, что информационно-управляющий алгоритм описывается двумя взаимно-связанными системами уравнений. Первая система определяет зависимость управляющих сигналов от апостериорных вероятностей состояний структуры, а вторая — зависимость вероятностей от управляющих сигналов. При этом первая система задана условиями в конечный момент времени $t = t_n$, а вторая — в начальный момент $t = 0$.

В итоге реализация оптимальных алгоритмов зачастую требует *неоправданно* большого объема памяти и высокого быстродействия вычислительных систем, поскольку высокая точность вычислений бесполезна при низкой точности априорной и апостериорной информации в условиях противодействия.

Для устранения указанных проблем в статье предлагается приближенно-оптимальный алгоритм, основанный на двух концепциях: 1) приближенная замена состояний структуры $s(t)$ его *оценкой* $\hat{s}(t)$; 2) использование в уравнениях алгоритма *установившихся* значений вычисляемых параметров.

В результате в соответствии с условиями задачи (1)–(9) уравнения блоков принимают следующий вид (аргумент t у всех функций, зависящих от него, опущен для простоты записи):

1. Алгоритм игрока U .

• Классификатор структуры

$$(10) \quad \begin{aligned} \dot{p}_u(1) &= - [h(\hat{x}_u) + g^\#(\hat{x}_u)] p_u(1) + g^\#(\hat{x}_u), \\ p_u(2) &= 1 - p_u(1), \end{aligned}$$

где $p_u(1)$, $p_u(2)$ — апостериорные вероятности состояний структуры:

$$p_u(1) \triangleq P[s(t) = 1|z_{0,t}], \quad p_u(2) \triangleq P[s(t) = 2|z_{0,t}],$$

$P[\cdot]$ – символ вероятности; $g^\#(\hat{x}_u)$ – функция $g(\cdot)$, определенная формулой (8), в которой аргумент $\hat{x}_v(t)$ приближенно заменен аргументом $\hat{x}_u(t)$.

• *Идентификатор структуры*

$$(11) \quad \hat{s}_u = \begin{cases} 1 & \text{при } p_u(1) > p_{\text{пор}}, \\ 2 & \text{при } p_u(1) \leq p_{\text{пор}}, \end{cases}$$

где $\hat{s}(t)$ – оптимальная оценка состояния структуры; $p_{\text{пор}}$ – заданная пороговая вероятность.

• *Фильтр и дисперсиометр*. Согласно уравнениям структурно-адаптивной одноканальной фильтрации [9, 10] приближенно-оптимальная оценка $\hat{x}_u$ определяется уравнениями:

$$(12) \quad \dot{\hat{x}}_u = a \left(-\hat{x}_u + u^* + v^\# - \frac{R_u(\hat{s}_u)}{Q_u} (z - \hat{x}_u) \right),$$

$$(13) \quad \dot{R}_u(\hat{s}_u) = -2aR_u(\hat{s}_u) - \frac{R_u^2(\hat{s}_u)}{Q_u} + a^2G(\hat{s}_u),$$

где $\hat{x}_u$ – оптимальная оценка x , $R_u(\hat{s}_u)$ – апостериорная дисперсия ошибки фильтрации, $u^*(t)$ – оптимальное минимаксное управление игрока U , а $v^\#$ – оптимальное максиминное управление игрока V , предполагаемое игроком U , оба основанные на оценке $\hat{x}_u(t)$, вычисляемой фильтром U (12), (13).

В установившемся режиме для $R_u(\hat{s}_u)$, т.е. при $\dot{R}_u(\hat{s}_u) = 0$, уравнения (12), (13) преобразуются к виду:

$$(14) \quad \dot{\hat{x}}_u = a [(r(\hat{s}_u) - 1)z - (r(\hat{s}_u) + d_u)\hat{x}_u],$$

$$(15) \quad r(\hat{s}_u) = \sqrt{1 + \frac{G(\hat{s}_u)}{Q_u}}.$$

• *Регулятор полосы пропускания и его параметры*. Для линейной системы ССС с линейно-квадратическим показателем качества и минимаксным критерием оптимизации [10–12] в соответствии с условиями задачи (1)–(9) приближенно-оптимальный алгоритм блока управления принимает следующий вид

$$(16) \quad u^* = -c_u \hat{x}_u, \quad c_u = \frac{\gamma_u d_u}{\gamma_u - \beta_u},$$

где

$$(17) \quad d_u = \sqrt{1 + \frac{\alpha(\gamma_u - \beta_u)}{\gamma_u \beta_u}} - 1,$$

$$(18) \quad \beta_u = p_u(1)\beta(1) + p_u(2)\beta(2),$$

$$(19) \quad \gamma_u = p_u(1)\gamma(1) + p_u(2)\gamma(2).$$

Таким образом, приближенно-оптимальный *минимаксный* алгоритм игрока U описывается замкнутой системой уравнений (7)–(11), (14)–(19) относительно $u^*(t)$ с входным сигналом $z(t)$.

2. Алгоритм игрока V .

Приближенно-оптимальный *максиминный* алгоритм игрока V описывается уравнениями, аналогичными уравнениям алгоритма U , с той, однако, принципиальной разницей, что алгоритм V создает в контуре управления *положительную* обратную связь, направленную на ухудшение устойчивости автоматической системы.

Замкнутая система уравнений алгоритма имеет следующий вид:

$$h^\#(\hat{x}_v(t)) = \begin{cases} h_{\max} & \text{при } |\hat{x}_v(t)| \leq \Delta; \\ h_{\min} & \text{при } |\hat{x}_v(t)| > \Delta; \end{cases}$$

$$g(\hat{x}_v(t)) = \begin{cases} g_{\min} & \text{при } |\hat{x}_v(t)| \leq \Delta; \\ g_{\max} & \text{при } |\hat{x}_v(t)| > \Delta, \end{cases}$$

где $h^\#(\hat{x}_v(t))$ – функция $h(\cdot)$, определенная формулой (7), в которой аргумент $\hat{x}_u$ приближенно заменен аргументом $\hat{x}_v$;

$$\begin{aligned} \dot{p}_v(1) &= - \left[h^\#(\hat{x}_v) + g(\hat{x}_v) \right] p_v(1) + g(\hat{x}_v), \\ p_v(2) &= 1 - p_v(1), \\ \hat{s}_v &= \begin{cases} 1 & \text{при } p_v(1) > p_{\text{пор}}, \\ 2 & \text{при } p_v(1) \leq p_{\text{пор}}, \end{cases} \\ \dot{\hat{x}}_v &= a[(\rho(\hat{s}_v) - 1)y - (\rho(\hat{s}_v) + d_v)\hat{x}_v], \\ (20) \quad \rho(\hat{s}_v) &= \sqrt{1 + \frac{G(\hat{s}_v)}{Q_v}}, \\ v^* &= c_v \hat{x}_v, \quad c_v = \frac{\beta_v d_v}{\gamma_v - \beta_v}, \\ \beta_v &= p_v(1)\beta(1) + p_v(2)\beta(2), \\ \gamma_v &= p_v(1)\gamma(1) + p_v(2)\gamma(2), \\ d_v &= \sqrt{1 + \frac{\alpha(\gamma_v - \beta_v)}{\gamma_v \beta_v}} - 1. \end{aligned}$$

Структурная схема автоматической системы, состоящей из объекта управления и двух систем управления — основной и системы противодействия, представлена на рис. 1.

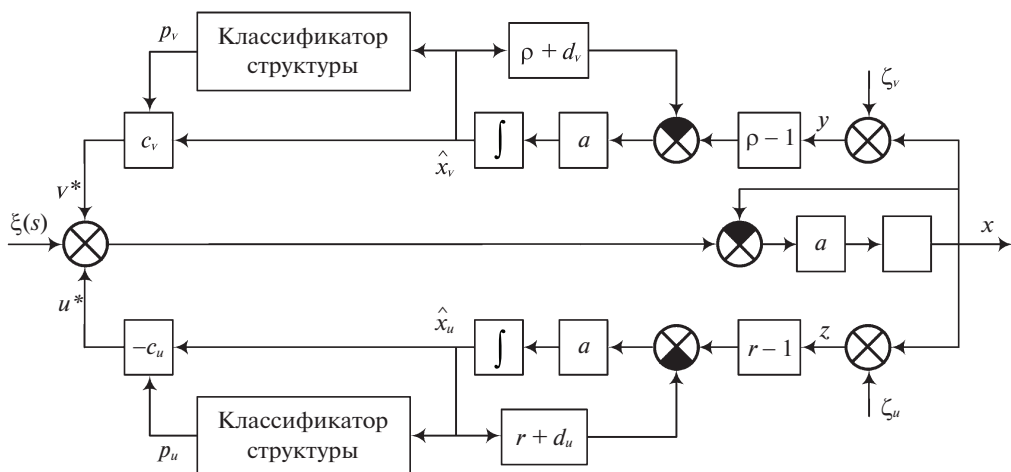


Рис. 1.

5. Пример

На рис. 2 изображены графики, иллюстрирующие работу алгоритма при следующих значениях параметров из условия задачи: $\alpha = 0,5$; $\beta(1) = 0,02$; $\beta(2) = 0,06$; $\gamma(1) = 0,3$; $\gamma(2) = 0,1$; $Q_u = Q_v = Q$; $G(1)/Q = 3$; $G(2)/G(1) = 3$; $\hat{x}_{u_k} = \hat{x}_{v_k} = \hat{x}_k$; $a = 1$; $h_{\max} = 0,18$; $h_{\min} = 0,02$; $g_{\max} = 0,12$; $g_{\min} = 0,06$; $\Delta = 3/8$. На рис. 2 обозначено: $\xi(t)$ – случайное возмущение; $I(t)$ – индикатор пересечения модуля выходного сигнала пределов допуска ($I(t) = 1$ при выходе за пределы допуска; $I(t) = -1$ при входе в пределы допуска); $|\hat{x}(t)|$ –

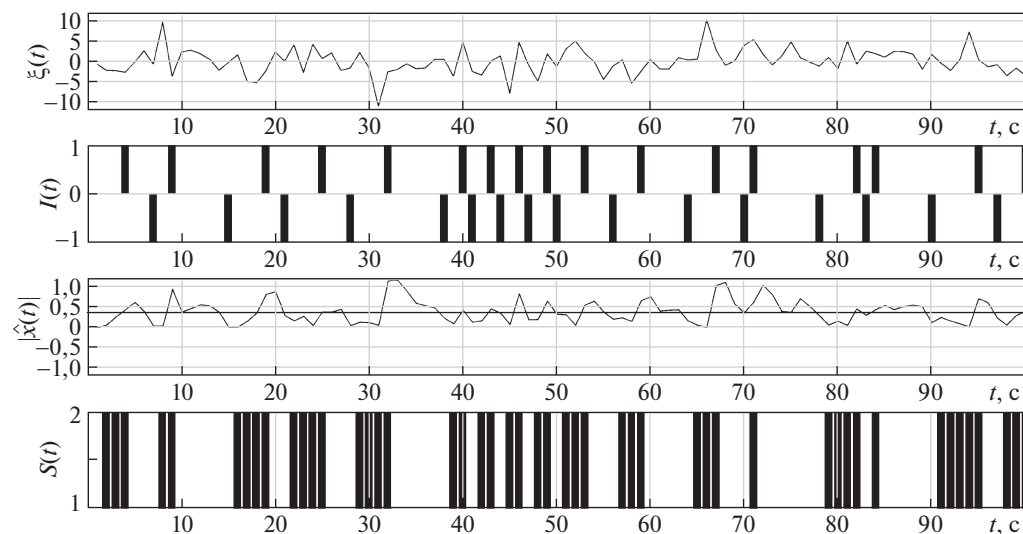


Рис. 2.

модуль оценки выходного сигнала; $s(t)$ – индекс состояний структуры; Δ – граница поля допуска.

Как видно из схемы, уравнений алгоритмов и рисунков, при резком и значительном увеличении (“выбросе”) случайного возмущения $\xi(t)$ или помехи $\zeta(t)$ в канале измерения модуль выходного сигнала $|x(t)|$, а вслед за ним и модуль оценки $|\hat{x}_u(t)|$ увеличиваются. Если $|\hat{x}_u(t)|$ выходит за пределы поля допуска $|\hat{x}_u(t)| > \Delta$, то, как следует из алгоритма классификатора, $p_u(1) > p_u(2)$ и $c_u \rightarrow \max c_u$, $\hat{G} \triangleq [p_u(1)G(1) + p_u(2)G(2)] \rightarrow G(1)$. Увеличение c_u в цепи отрицательной обратной связи автоматической системы и уменьшение интенсивности входного возмущений приводят к уменьшению $|x(t)|$, $|\hat{x}_u(t)|$, и если $|\hat{x}_u(t)|$ становится меньше Δ , то $p_u(1) < p_u(2)$, $c_u \rightarrow \min c_u$, $\hat{G}_U \rightarrow G(2)$ и система переходит в нормальный “экономный” режим, при котором “энергетические” затраты на поддержание состояния $|\hat{x}_u| \leq \Delta$ минимальны.

Система противодействия, наоборот, на состояние $|\hat{x}_v(t)| \leq \Delta$ реагирует увеличением коэффициента c_v в цепи положительной обратной связи и увеличением интенсивности входного возмущения, стремясь ухудшить характеристики устойчивой работы автоматической системы.

Как следует из уравнений алгоритмов, устойчивость работы обеспечивается при выполнении условия $\gamma(1), \gamma(2) > \beta(1), \beta(2)$. Практически это означает, что технические, эксплуатационные или какие-нибудь другие характеристики, ограничивающие допустимые энергетические затраты, у основной системы управления лучше, чем аналогичные характеристики системы противодействия.

С теоретической точки зрения полученные результаты показывают, что рассмотренная задача представляет собой антагонистическую дифференциальную игру с неполной информацией, ненулевой суммой и без седловой точки вследствие различной информированности игроков о состоянии игры.

6. Заключение

Решена задача синтеза игрового минимаксно-максиминного алгоритма управления полосой пропускания автоматической системы. При ее решении использованы методы теории дифференциальных игр, теории систем со случайной скачкообразной структурой, теории марковских процессов и байесовское оценивание состояния системы.

Получены приближенно-оптимальные информационно-управляющие алгоритмы двух противоборствующих сторон — игроков, один из которых стремится улучшить качество переходных процессов системы, другой — ухудшить. При этом каждый основывается на показаниях своего датчика информации, подверженного помехам. В результате задача управления представляет собой игру с неполной информацией, ненулевой суммой и без седловой точки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айзекс Р. Дифференциальные игры. М.: Мир, 1967.
2. Пугачёв В.С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. М.: Физматлит, 1960.
3. Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем. М.: Наука, 1966.
4. Аоки М. Оптимизация стохастических систем. М.: Наука, 1971.
5. Брайсон А.Е., Хо Ю Ши. Прикладная теория оптимального управления. М.: Мир, 1972.
6. Саридис Дж. Н. Самоорганизующиеся стохастические системы управления. М.: Наука, 1980.
7. Kazakov Y.E., Artemiev V.M., Bukhalev V.A. Principles of the Construction on Complex Algorithms for Information Processing and Control in System with Stochastic Exchange Structure // II IFAC Symp. on Stochastic Control. 1986. Part 1.
8. Piers B.D., Swarder D.D. Bayes and Minimax Controllers for a Linear Systems for Stochastic Jump Parameters // IEEE Trans. AC-16. 1971. No. 4. P. 677–685.
9. Бухалёв В.А. Игровая задача управления в системе со случайной скачкообразной структурой // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1993. № 2. С. 122–132.
10. Бухалёв В.А. Распознавание, оценивание и управление в системах со случайной скачкообразной структурой. М.: Наука, 1996.
11. Бухалёв В.А., Скрынников А.А., Болдинов В.А. Алгоритмическая помехозащита беспилотных летательных аппаратов. М.: Физматлит, 2018.
12. Бухалёв В.А., Скрынников А.А., Болдинов В.А. Игровое управление системами со случайной скачкообразной структурой. М.: Физматлит, 2021.
13. Оуэн Г. Теория игр. М.: Вузовская книга, 2007.
14. Zhang C., Zhu H., Zhou H., Bin N. Deterministic and Stochastic Differential Games / Non-cooperative Stochastic Differential Game Theory of Generalized Markov Jump Linear Systems. Studies in Systems, Decision and Control. V. 67. Springer, Cham. 2017.
15. Moon J. A Sufficient Condition for Linear-Quadratic Stochastic Zero-Sum Differential Games for Markov Jump Systems // IEEE Trans. Autom. Control. 2019. V. 64. No. 4. P. 1619–1626.
16. Mariton M. Jump Linear Systems in Automatic Control. Taylor & Francis, 1990.
17. Kats I.Ya., Martynyuk A.A. Stability and Stabilization of Nonlinear Systems with Random Structures. CRC Press, 2003.

Статья представлена к публикации членом редколлегии П.В. Пакиным.

Поступила в редакцию 02.05.2021

После доработки 02.10.2021

Принята к публикации 15.10.2021