

НАСТРОЙКА ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРОВ ПОДСИСТЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ СКОРОСТИ И КУРСА АВТОНОМНЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Тягунов О.А.

*МИРЭА – Российский технологический университет, 119454, Россия, г. Москва, проспект Вернадского, 78,
e-mail: tyagunov@mirea.ru*

Рассматривается задача настройки параметров типовых регуляторов для стабилизации скорости и курса автономного мобильного робота. Для решения задачи используется технология многокритериального выбора параметров, основанная на случайном зондировании многомерного пространства оптимизируемых параметров с последующим построением приближенной границы точек Парето. В качестве критериев для оптимизации выбраны параметры «степень устойчивости» и «колебательность». Проведены испытания настроек при помощи имитационной модели, разработанной в среде «универсальный механизм».

Ключевые слова: типовой регулятор, мобильный робот, многокритериальный выбор, точки Парето, степень устойчивости, колебательность.

SETTING UP THE PARAMETERS OF THE SPEED AND COURSE STABILIZATION SUBSYSTEMS OF AUTONOMOUS MOBILE ROBOTS BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES

Tyagunov O.A.

*MIREA – Russian Technological University, 119454, Moscow, 78 Vernadsky Avenue, Russia,
e-mail: tyagunov@mirea.ru*

The problem of setting parameters of typical controllers for stabilizing the speed and course of an autonomous mobile robot is considered. To solve the problem, the technology of multi-criteria parameter selection is used, based on random probing of the multidimensional space of optimized parameters with subsequent construction of an approximate boundary of Pareto points. The parameters "degree of stability" and "oscillation" are selected as criteria for optimization. Tests of settings are carried out using a simulation model developed in the "universal mechanism" environment.

Keywords: typical controller, mobile robot, multicriteria choice, Pareto points, degree of stability, oscillation.

Введение

Как известно, в состав исполнительной подсистемы автономного мобильного робота (АМР) должны входить системы автоматического управления отдельными режимами, такими как стабилизация скорости и курса. Ранее в ряде публикаций [1-5] рассматривались задачи построения систем автоматического управления основными режимами движения АМР для сравнительно простых моделей взаимодействия движителя АМР с поверхностью перемещения. Полученные результаты оказались малоприменимыми для построения систем управления АМР с учетом более сложного многообразия процессов, происходящих при движении колесных и гусеничных АМР по различным поверхностям.

Настоящая статья посвящена задаче настройки параметров типовых регуляторов подсистем автоматической стабилизации скорости и курса движения АМР на основе использования технологий искусственного интеллекта.

Функциональная и структурная схемы стабилизации скорости АМР

Рассмотрим сначала функциональную схему стабилизации АМР как колесного, так и гусеничного исполнения, основываясь на особенностях построения аппаратных средств колесных и гусеничных машин [6, 7]

(рис. 1).

Основным элементом схемы является объект управления — АМР. Выходной переменной АМР является линейная скорость движения центра масс V , а входным воздействием — момент M , поступающий от коробки передач либо на ведущие колеса (гусеничный вариант АМР), либо непосредственно на колеса (колесный вариант АМР) и создающий тяговое усилие P_T , заставляющее АМР передвигаться [6÷8].



Рис. 1. Функциональная схема контура стабилизации скорости АМР

Следующий элемент схемы КП (коробка передач) — это элемент трансмиссии АМР, который служит для увеличения момента $M_{дв}$, создаваемого двигателем с одновременным снижением угловой скорости вращения вала двигателя $\omega_{дв}$ (коленчатого вала). На практике могут использоваться либо ступенчатые механические варианты КП, имеющие конечное число (не более 10) значений коэффициента передач, либо автоматические варианты КП с возможностью выбора непрерывных значений коэффициента передач из заданного диапазона.

Рассмотрим следующие два элемента функциональной схемы — «двигатель» и «рейка ТН (топливного насоса)». Известно, что в тяжелых АМР в качестве источника движения, в основном, используются дизельные двигатели. К наиболее значимым характеристикам двигателей относятся скоростные характеристики — зависимости мощности (момента $M_{дв}$), развиваемые двигателем как функции угловой скорости вала двигателя

$\omega_{дв}$ при фиксированном расходе топлива g_e , который однозначно определяется положением рейки топливного насоса (ТН) (педали газа) h [9]. При всех возможных значениях положения рейки топливного насоса h получается совокупность частичных скоростных характеристик, которые обычно задается в паспортных данных к двигателю. Элемент функциональной схемы «Датчик» — это устройство, дающее

информацию о линейной скорости V движения АМР. В качестве датчика обычно используются тахометры, установленные на валу ведущего колеса. Возможны варианты использования акселерометров, позволяющих получать информацию о линейной скорости с учетом проскальзывания (пробуксовки) колес (гусениц) движителя АМР.

Наконец, элемент «Регулятор» задает закон управления (стабилизации) — функциональную зависимость положения рейки ТН как функцию ошибки регулирования $\Delta V = V^* - V$.

Перейдем к рассмотрению математических моделей основных элементов функциональной схемы (рис.1). Хорошо известно, что полные уравнения динамики АМР, описывающие динамику его движения в трехмерном пространстве с учетом сложного взаимодействия движителя АМР с поверхностью, получить в явном виде практически невозможно.

Тем не менее, в теории и практике исследования АМР накоплен опыт построения упрощенных уравнений динамики, которые можно использовать при разработке алгоритмического и программного обеспечения для управления основными режимами движения АМР (разгон, торможение, выход на заданную скорость движения и ее стабилизация, поворот на заданный угол (курс) движения и его стабилизация, поворот с заданным радиусом поворота и т.д.). Эффективность разработанных алгоритмов можно в дальнейшем проверить на имитационных математических моделях, учитывающих все особенности движения АМР.

Будем рассматривать прямолинейное движение АМР с моделью динамики в следующем виде [6, 8]

$$m\ddot{x} = P - G(\sin \gamma + f \cos \gamma). \quad (1)$$

В (1) приняты следующие обозначения

\ddot{x} — ускорение центра масс АМР, P — сила тяги АМР, G — вес АМР, γ — угол подъема (спуска) АМР (угол дифферента), f — коэффициент сопротивления качению.

Отметим основные особенности уравнения (1), которые делают его удобным для построения алгоритмов управления движением в вертикальной плоскости:

1. Правая часть уравнения представлена в аддитивной форме — разделены сила тяги P и сила сопротивления движению $G(\sin \gamma + f \cos \gamma)$. Заметим, что в общем случае эта взаимосвязь имеет более сложный характер и представляется в алгоритмической форме.

2. В уравнении (1) в явном виде присутствуют основные факторы неопределенности, представленные массой m АМР, углом дифферента γ и коэффициентом сопротивления качению f .

3. В задаче построения алгоритмов стабилизации скорости движения объект управления (АМР) может быть представлен интегрирующим звеном с коэффициентом пропорциональности $1/m$, причем сила сопротивления движению $G(\sin \gamma + f \cos \gamma)$ играет роль возмущающего воздействия. Это обстоятельство необходимо учитывать при выборе структуры и параметров закона стабилизации скорости.

4. Так как основные факторы неопределенности являются сравнительно медленно меняющимися величинами, будем в уравнении (1) полагать их постоянными.

Математическая модель исполнительной подсистемы АМР (элементы «двигатель», «рейка ТН» «КП» функциональной схемы)

В [9] было отмечено, что динамика переходных процессов в двигателе (изменение угловой скорости вращения коленчатого вала как функция изменения расхода топлива) может быть описана следующим линейным дифференциальным уравнением первого порядка

$$T_{\partial\partial} \frac{dM_{\partial\partial}}{dt} + M_{\partial\partial} = g_e, \quad (2)$$

где значение постоянной времени $T_{\partial\partial}$ и коэффициента передачи $k_{\partial\partial}$ определяются из паспортных данных двигателя. В соответствии с данными [8] будем полагать, что управляемое перемещение рейки топливного насоса, осуществляемое механическими тягами, может быть описано дифференциальным уравнением

$$T_{рейки} \frac{dh}{dt} + h = h^* \quad (3)$$

с постоянной времени $T_{рейки}$.

Будем рассматривать идеальный вариант КП, при котором математическая модель КП может быть представлена в виде коэффициента передачи $k_{КП}$, который может принимать либо непрерывные значения из диапазона $[k_{КПmin}, k_{КПmax}]$ (автоматическая КП), либо конечное число (не более 10) значений (ступенчатая КП). Будем также полагать, что датчик скорости может быть описан передаточной функцией вида

$$W_{датчик}(s) = 1.$$

В итоге, математическую модель объекта управления (АМР в режиме прямолинейного движения и исполнительная часть (двигатель и трансмиссия)) можно представить в виде последовательного соединения следующих элементарных звеньев с передаточными функциями

$$W_{PTK}(s) = \frac{1}{ms}, \quad W_{\partial\partial}(s) = \frac{k_{\partial\partial}}{T_{\partial\partial}s + 1}, \quad W_{рейки}(s) = \frac{1}{T_{рейки}s + 1}, \quad W_{КП}(s) = k_{КП}. \quad (4)$$

При формировании структурной схемы системы автоматического регулирования скорости АМР оказалось удобным выполнить операцию *нормирования* выражений (4), с тем, чтобы сократить общий, достаточно большой, объем вычислительных экспериментов, необходимых для оптимизации параметров регуляторов.

Операция нормирования заключалась в вынесении массы m АМР из числа параметров интегрирующего звена, описывающего динамику АМР, и рассмотрении стандартных типовых звеньев контура стабилизации скорости

скорости $\frac{1}{s}$, $W_{\partial\partial}(s) = \frac{1}{T_{\partial\partial}s + 1}$, $W_{рейки}(s) = \frac{1}{T_{рейки}s + 1}$; при этом все параметры, определяющие

коэффициент передачи, включая $k_{КП}$, включены в выражение для передаточной функции регулятора $W_{рег}^*$.

В итоге, получаем структурную схему системы автоматического регулирования скорости АМР (рис. 2). На структурной схеме *нормированное* возмущение представлено в виде выражения $\mu = \frac{G(\sin \gamma + f \cos \gamma)}{m}$.

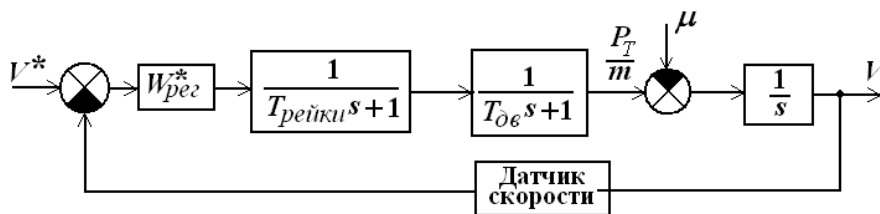


Рис. 2. Структурная схема контура стабилизации скорости АМР

Следует заметить, что такие неопределенности, как угол дифферента γ и коэффициент сопротивления качению f не оказывают непосредственного влияния на динамику переходных процессов в контуре стабилизации скорости. Вместе с тем их влияние может сказываться на величине установившейся ошибки регулирования в случае использования регулятора, не обладающего свойством астатизма относительно возмущения, роль которого играет слагаемое μ .

Функциональная и структурная схемы стабилизации курса АМР

Для реализации двух важных режимов движения АМР (поворот на заданный угол и стабилизация курса движения) необходимо создать условия для обеспечения неравенства линейных скоростей левого и правого бортов АМР. Эта операция осуществляется с помощью механизма поворота (МП). Существуют различные способы реализации МП. Наиболее часто реализуются два варианта МП:

1. *МП непрерывного (плавного) типа*. Этот вариант может быть осуществлен за счет:

- подачи разных по модулю значений напряжений на электрические двигатели, создающие разные моменты на ведущих колесах (АМР среднего класса);
- использования бортовых фрикционов, создающих тормозящие моменты на отстающих бортах (ведущих колесах) (АМР тяжелого класса);
- использования на каждом борту АМР тяжелого класса индивидуальных автоматических коробок передач.

Особенностью этого варианта МП является реализация плавного регулирования радиуса поворота АМР.

2. *МП дискретного типа*. Этот тип МП используется, в основном, в тяжелых вариантах АМР за счет применения планетарного механизма, позволяющего понизить линейную скорость отстающего борта за счет переключения его на пониженную передачу. Фактически при использовании этого варианта МП реализуется режим релейного управления.

Таким образом, функциональная схема подсистемы стабилизации курса АМР может быть представлена в следующем виде (рис. 3).

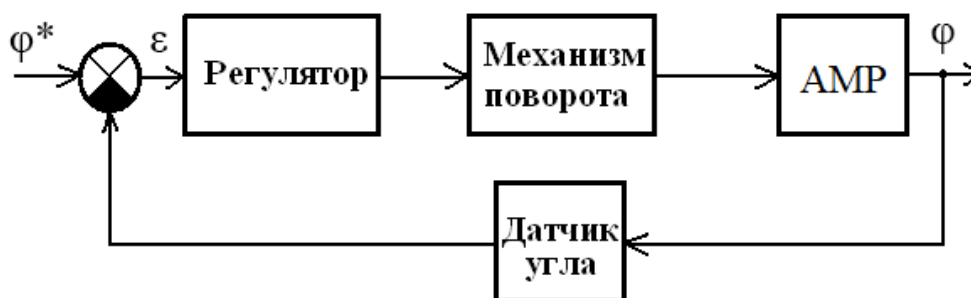


Рис. 3. Функциональная схема контура стабилизации курса АМР

Рассмотрим основные особенности функциональной схемы стабилизации курса АМР. Основным элементом

схемы является объект управления — АМР. Выходной переменной АМР является текущее значение курса φ , а входным воздействием — момент поворота [6, 8].

Элемент функциональной схемы «Датчик угла» — это устройство, дающее информацию о текущем курсе движения АМР.

В качестве датчика могут быть использованы различные датчики, включая гироскопические платформы и т.д.

Наконец, элемент «Регулятор» задает закон управления (стабилизации) — функциональную зависимость момента поворота M как функцию ошибки регулирования $\varepsilon = \varphi^* - \varphi$.

Перейдем к рассмотрению структурной схемы подсистемы стабилизации курса АМР

Математическая модель АМР.

Будем рассматривать движение АМР в горизонтальной плоскости с уравнениями динамики в следующем виде [8]

$$m \frac{d^2 s}{dt^2} = F_0 + F_t - R_c; \quad (5)$$

$$I_z \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = \frac{B}{2} (F_0 - F_t) - M_c, \quad (6)$$

где S — линейное перемещение центра тяжести АМР; φ — угловое перемещение (курс) АМР; B — колея АМР (т. е. расстояние между центральными линиями гусениц (колесами)); J_z и m — момент инерции массы машины относительно вертикальной оси проходящей через ее центр тяжести, и масса АМР соответственно, F_3 и F_0 тяговые силы на забегавшей и отстающей гусеницах (колесах) соответственно; R_c и M_c — силы результирующего сопротивления и момент сопротивления повороту, приложенные к гусенице (колесам) со стороны грунта (поверхности перемещения).

Уравнения (5) и (6) описывают режимы криволинейного движения АМР на плоскости, включая режимы поворота на заданный угол (курс) движения и его стабилизация. Следует заметить, что для режима стабилизации курса, как правило, характерно сравнительно небольшое изменение линейной скорости АМР, поэтому будем полагать, что динамические свойства АМР в режиме стабилизации скорости могут быть описаны уравнением (6). В частности, передаточная функция АМР может быть представлена в виде последовательного соединения двух интегрирующих звеньев

$$W_{MPTK}(s) = \frac{k}{s^2}. \quad (7)$$

Математическая модель механизма поворота

Выше было отмечено, что для реализации режима стабилизации курса АМР могут быть использованы два варианта механизма поворота (МП) — МП плавного типа и МП дискретного типа. Несмотря на принципиальное отличие принципов работы МП и различные аппаратные средства их реализации, для описания переходных процессов в МП можно использовать математическую модель следующего вида [9]

$$W_{МП}(s) = \frac{k}{T_{МП}s + 1}.$$

Выбор структуры регулятора скорости движения АМР

Воспользуемся классическими методиками определения структуры регулятора для сравнительно несложных объектов управления [10], к которым в полной мере можно отнести рассматриваемый нами случай. Прежде всего, можно выделить два варианта типовых регуляторов, которые могут быть рекомендованы для стабилизации скорости АМР. Рассмотрим эти варианты.

- *Пропорционально-дифференциальный регулятор* (ПД – регулятор). Использование этого регулятора позволяет получить высокое качество переходных процессов в контуре стабилизации (по времени регулирования и практически монотонный характер переходных процессов). Однако этот регулятор не обладает свойством астатизма по возмущению (слагаемое μ в структурной схеме рис. 2); поэтому при некоторых значениях факторов неопределенности γ и f значение установившейся ошибки регулирования скорости может превысить максимально допустимое значение.

- *Пропорционально-интегральный-дифференциальный регулятор* (ПИД – регулятор). Использование этого регулятора обеспечивает нулевое значение установившейся ошибки регулирования скорости, вызываемой возмущающим воздействием. Однако при использовании этого регулятора качество переходного процесса хуже по сравнению со случаем использования ПД – регулятора (увеличивается время регулирования и появляется перерегулирование).

Выбор структуры регулятора курса АМР с механизмом поворота плавного типа

Использование классических методик позволяет выделить четыре варианта типовых регуляторов, которые могут быть рекомендованы для стабилизации курса движения АМР с МП плавного типа. Рассмотрим эти варианты.

- *Пропорционально-дифференциальный-дифференциальный регулятор* (ПДД – регулятор).
- *Пропорционально-интегральный-дифференциальный- дифференциальный регулятор* (ПИДД – регулятор).

Интеллектуальные технологии в задаче многокритериального выбор параметров регуляторов скорости и курса АМР

Известно, что в теории и практике синтеза систем управления доминируют традиционные методы, предполагающие при выборе параметров управляющих устройств использование одного, пусть и достаточно сложного, показателя качества (критерия). Ряд исследователей отмечали противоречивость такой постановки задачи и подчеркивали необходимость перехода к многокритериальному выбору параметров (А.М. Летов [12], А.А. Фельдбаум [13] и др.). Проблема многокритериальной оптимизации (выбора параметров) интенсивно разрабатывалась специалистами в области исследования операций, начиная с 60-х годов XX века. В отличие от задач исследования операций проблеме многокритериального выбора параметров динамических систем уделялось существенно меньшее внимание. Одной из первых публикаций, посвященных многокритериальному синтезу параметров систем управления, была работа А.М. Летова [12], в которой были выделены критерии, по которым необходимо выбирать параметры систем управления. В [14] обсуждалась общая постановка задачи многокритериального выбора параметров систем автоматического управления. Следует, наконец, отметить [15], где впервые была высказана необходимость применения разработанного И.М. Соболев и Р.Б. Статниковым метода многокритериальной оптимизации, основанного на использовании процедуры сканирования области допустимых значений пространства оптимизируемых параметров равномерно распределенными векторами с последующей операцией построения граничных точек (точек Парето) в критериальном пространстве [16], для решения задач многокритериального выбора параметров систем управления. За рубежом этот метод получил название «метод PSI» («Parameter State Investigation») [17].

Определенный прогресс в развитии методов многокритериального выбора параметров систем управления был достигнут в серии публикаций [18÷20], а также в [21], в которых:

1. Развита технология исследования устойчивости и качества линейных стационарных систем управления высокой размерности на основе использования прямых корневых методов.

2. Обоснованы основные этапы решения задач многокритериального выбора параметров:

- формализация задачи, включая обоснованный выбор системы критериев качества, по которым будет определяться оптимальное решение;

- выбор в пространстве оптимизируемых параметров парето -оптимальных решений;

- выбор принципа нахождения компромисса, позволяющего находить решение по всем локальным (частным) критериям с учетом их противоречивого характера.

3. Разработана высокоэффективная модификация версии метода И.М. Соболя и Р.Б. Статникова глобального зондирования пространства параметров с использованием наиболее равномерно распределенных последовательностей с процедурой построения точек Парето в сечениях критериального пространства.

4. Показано, что при многокритериальном выборе параметров линейных систем управления наиболее целесообразно использовать систему критериев «степень устойчивости—колебательность», обладающую свойством слабой коррелированности и позволяющую адекватно оценивать динамические свойства систем управления.

5. Разработан эффективный комплекс программных средств «Анализ систем» для решения задач моделирования и многокритериального выбора параметров систем управления [22].

6. Модернизированная технология многокритериального выбора показала эффективность при решении задач оптимизации параметров систем управления сложных многосвязных мехатронных систем [21]

Это позволяет использовать полученные результаты при решении задачи многокритериального выбора параметров *регулятора скорости АМР*. В качестве критериев оптимальности использовалась совокупность

двух критериев “степень устойчивости η —колебательность μ ”, описывающих две важнейшие характеристики систем управления — быстродействие (“степень устойчивости”) и колебательные свойства (“колебательность”). При выборе настроек регулятора для обеспечения высокого качества переходного процесса необходимо уменьшать значения критерия «колебательность» и увеличивать значение критерия “степень устойчивости” [22]. Следует заметить, что в программном комплексе «Анализ систем», используемом для задачи настроек регуляторов, для достижения максимума степени устойчивости *отыскивается минимум обратной ей величины*. Приведем результаты нахождения оптимальных настроек для выбранных двух вариантов регулятора (ПД – и ПИД –регулятор).

На рис. 4 представлено распределение значений критериев на плоскости критериального пространства для случая ПД – регулятора, на котором ломаной линией показана приближенная кривая Парето. Именно среди пяти точек, лежащих на этой ломаной, разработчику системы управления и следует выбирать устраивающий его вариант настроек регулятора. В табл. 1 помещены данные значений показателей качества переходного процесса (время регулирования t_p и перерегулирование σ) для каждой точки Парето –оптимальной точки.

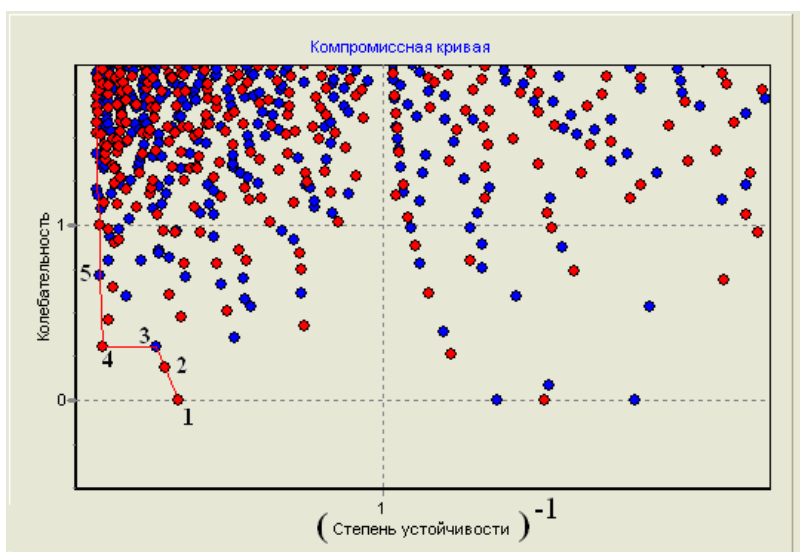


Рис. 4. Эффективные точки Парето в сечении критериального пространства параметров «колебательность-степень устойчивости» для ПД регулятора в задаче стабилизации скорости АМР

Табл. 1. Показатели качества переходного процесса для Парето-оптимальных решений для ПД –регулятора скорости АМР

Показатель качества	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5
Время регулирования t_p , сек	2,3	1,8	1,65	1,35	1,18
Перерегулирование σ , %	2,5	4	5	8	12

На рис. 5 представлено распределение значений критериев на плоскости критериального пространства для случая ПИД – регулятора, на котором ломаной линией показана приближенная кривая Парето, содержащая 8 точек. В табл. 2 помещены данные значений показателей качества переходного процесса (время регулирования t_p и перерегулирование σ) для каждой точки Парето –оптимальной точки.

Табл. 2. Показатели качества переходного процесса для Парето-оптимальных решений для ПИД -регулятора скорости АМР

Показатель качества	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5	Вариант 6	Вариант 7	Вариант 8
Время регулирования t_p , сек	2,84	2,56	1,78	1,43	1,3	1,05	1,43	1,49

Перерегулирование $\sigma, \%$	9	13	25	36	29	39	42	57
-----------------------------------	---	----	----	----	----	----	----	----

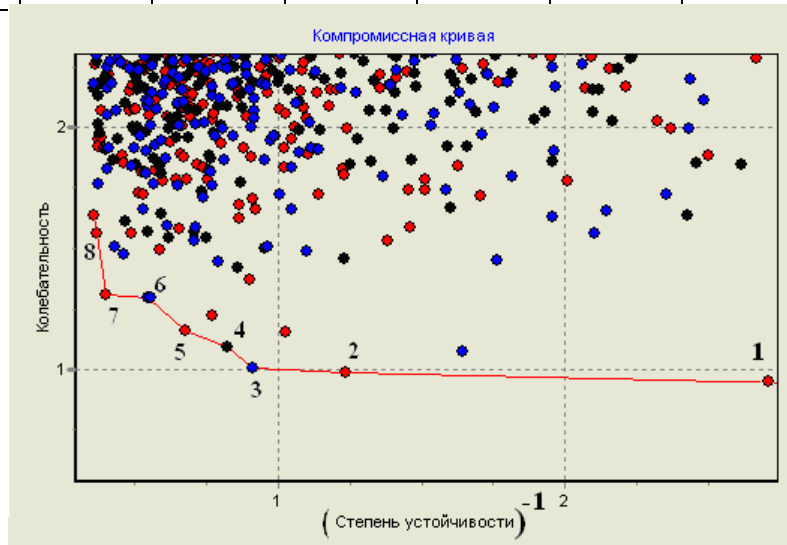


Рис. 5. Эффективные точки Парето в сечении критериального пространства параметров «колебательность-степень устойчивости» для ПИД регулятора в задаче стабилизации скорости АМР

Исследование точностных характеристик процесса стабилизации скорости РТК. При этом рассчитывается установившееся значение ошибки управления $\varepsilon_{устВозм}$ по возмущающему воздействию $\mu = \frac{G(\sin \gamma + f \cos \gamma)}{m}$.

Заметим, что в силу того, что объект управления описывается интегрирующим звеном, то система стабилизации скорости обладает свойством астатизма относительно задающего воздействия V^* . Из результатов классической теории автоматического управления [12, 13] следует, что при использовании ПИД – регулятора имеет место свойство астатизма по возмущающему воздействию и $\varepsilon_{устВозм} = 0$ (заметим, что возмущение считается постоянным).

В случае же использования ПД – регулятора свойство астатизма по возмущающему воздействию не имеет место и $\varepsilon_{\text{ош}} = \frac{1}{k_i^*} \cdot \frac{G(\sin \gamma + f \cos \gamma)}{m}$.

Заметим, что передаточная функция ПД – регулятора равна $W_{рег}^*(s) = k_n^* + k_\delta^* s$, причем коэффициенты регулятора k_n^*, k_δ^* определяются с учетом операции нормирования, описанной выше. Анализ выражения $\varepsilon_{устВозм}$ позволяет сделать вывод, что при определенных значениях факторов неопределенности (угол дифферента γ возрастает – наезд на горку, коэффициент сопротивления качению f увеличивается – тяжелый, вязкий грунт) значения ошибки $\varepsilon_{устВозм}$ возрастают и могут превысить допустимые значения при использовании ПД – регулятора в установившемся режиме. Следует заметить, окончательное решение о выборе типа регулятора и его настройках принимается ЛПР.

Будем теперь решать задачу многокритериального выбора параметров регулятора курса АМР. Как и ранее в качестве критериев оптимальности использовалась совокупность двух критериев “степень устойчивости (η) —колебательность (μ)”. Приведем результаты нахождения оптимальных настроек для выбранных двух вариантов регулятора (ПДД— и ПИДД— регуляторы).

На рис. 6 представлено распределение значений критериев на плоскости критериального пространства для случая ПДД – регулятора, на котором ломаной линией показана приближенная кривая Парето, а в табл. 3 помещены данные значений показателей качества переходного процесса (время регулирования t_p и перерегулирование σ) для каждой точки Парето –оптимальной точки.

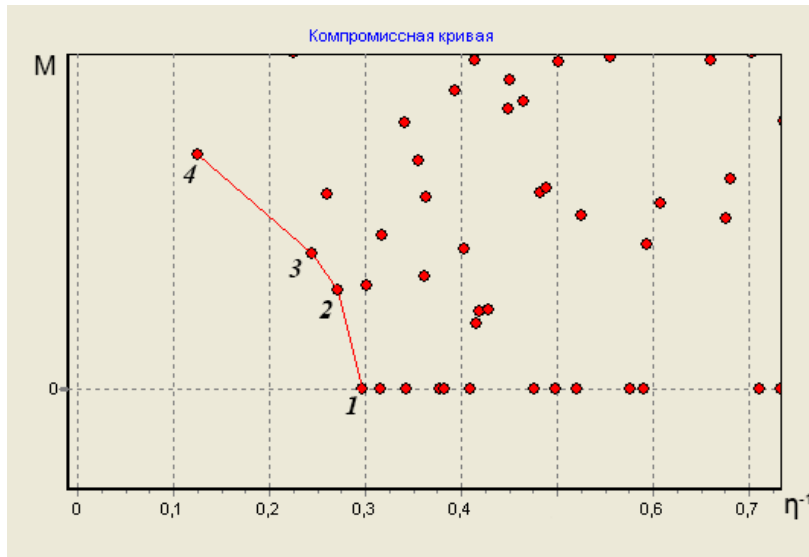


Рис. 6. Эффективные точки Парето в сечении критериального пространства параметров «колебательность-степень устойчивости» для ПДД регулятора в задаче стабилизации курса АМР

Наконец, на рис. 7 представлено распределение значений критериев на плоскости критериального пространства для случая ПИДД – регулятора, на котором ломаной линией показана приближенная кривая Парето, а в табл. 4 помещены данные значений показателей качества переходного процесса (время регулирования t_p и перерегуливание σ) для каждой точки Парето –оптимальной точки.

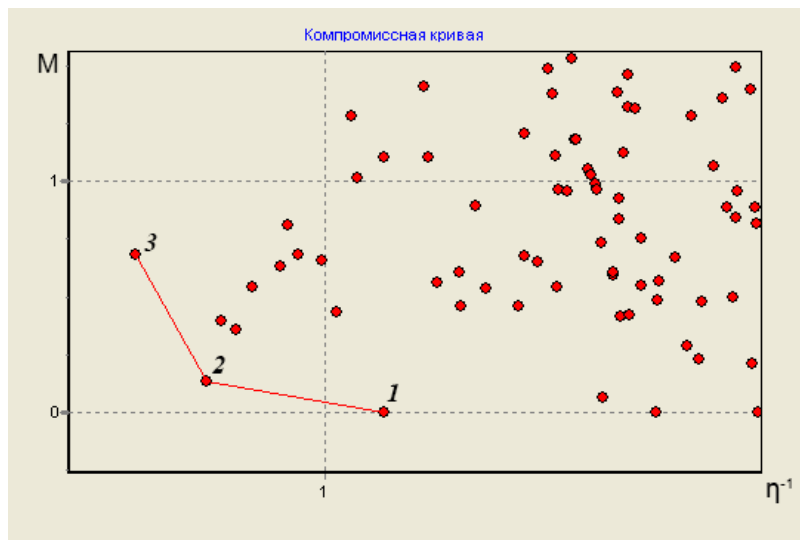


Рис. 7. Эффективные точки Парето в сечении критериального пространства параметров «колебательность-степень устойчивости» для ПИДД регулятора в задаче стабилизации курса АМР

Табл. 4. Показатели качества переходного процесса для Парето-оптимальных решений для ПИДД – регулятора курса АМР

Показатель качества	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Время регулирования t_p , сек	0,12	0,18	0,47
Перерегуливание σ , %	5	3	10

Представленные результаты позволяют сделать следующий вывод:

Типовые регуляторы ПДД и ПИДД позволяют получить существенно *более лучшие характеристики переходного процесса в процессе автоматической стабилизации курса* движения АМР по сравнению с ПД и ПИД –регуляторами соответственно, причем ПИДД регулятор позволяет обеспечить дополнительное свойство инвариантности к возмущениям, действующим на АМР в процессе доворотов, неизбежно возникающих при стабилизации курса [9÷11].

Проверка полученных настроек регуляторов на имитационных моделях

Автор был разработан программный комплекс в среде «Универсальный механизм» [24], с помощью которого была проверена эффективность разработанных алгоритмов стабилизации скорости АМР. Из основных особенностей программного комплекса можно отметить:

- подробная геометрическая модель АМР экспортируется в среду «Универсальный механизм», который строит модели кинематики и динамики АМР;
- математическая модель исполнительного уровня АМР экспортируется в «Универсальный механизм»;
- «Универсальный механизм» генерирует уравнения управляемого движения, выполняет интегрирование этих уравнений и с последующим отображением результатов расчета с помощью средств виртуальной реальности.

Данные предварительного моделирования свидетельствуют о принципиальной работоспособности разработанных алгоритмов стабилизации скорости и о возможности их использования в подсистемах исполнительного уровня АМР различного назначения.

Заключение

В работе представлен вариант использования современных интеллектуальных технологий для решения задачи настройки параметров типовых регуляторов подсистем автоматической стабилизации скорости и курса движения АМР.

В отличие от методов классической теории управления методология многокритериального выбора параметров настроек регуляторов (в рамках выбранной структуры регулятора) позволяет рассматривать не одно единственное решение (набор настроек регулятора), а целое множество решений. Это позволяет более обоснованно подойти к решению проблемы выбора параметров регуляторов с учетом противоречивого характера требований, предъявляемых к динамике процесса регулирования.

В качестве критериев для оптимизации выбраны параметры «степень устойчивости» и «колебательность». Проведены испытания настроек при помощи имитационной модели, разработанной в среде «Универсальный механизм».

Список литературы

1. Iagnemma K., Dubowsky S. Mobile Robots in Rough Terrain. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2004, 110 p.
2. Lamon P. 3D- position Tracking and Control for All-Terrain Robots. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2008, 104 p.
3. Бурдаков С.Ф., Мирошник И.В., Стельмаков Р.Э. Системы управления движением колесных роботов.– СПб.: Наука, 2001. –227 с.
4. Мартыненко Ю.Г. Управление движением мобильных колесных роботов // Фундаментальная и прикладная математика. М.: Изд_во МГУ, 2005. Т. 11. Вып. 8. с. 29–80.
5. Емельянов С.Н., Платонов А.К., Ярошевский В.С. Система управления полноприводного трехколесного движителя // Мобильные роботы и мехатронные системы. М.: Изд_во МГУ, 2000. С. 89–99.
6. Забавников Н.А. Основы теории транспортных гусеничных машин.— М.: Машиностроение, 1975.-448 с.
7. Платонов В.Ф., Леишвили Г.Р. Гусеничные и колесные транспортно-тяговые машины .– М.: Машиностроение, 1986.–296 с.
8. Вонг Дж. Теория наземных транспортных средств. – М.: Машиностроение, 1982.- 284 с.
9. Крутов В.И. Автоматическое регулирование двигателей внутреннего сгорания. —М.: Машиностроение, 1979.—с. 615.
10. Ким Д.П. Теория автоматического управления, т. 1.— М.: Физматлит, 2003.- 250 с.
11. Цыпкин Я.З. Основы теории автоматических систем.— М.: Наука, 1977.-468 с.
12. Летов А.М. Динамика полета и управление.— М.: Наука, 1969. 258 с.
13. Фельдбаум А.А. Электрические системы автоматического регулирования.— М.: Оборонгиз, 1957. 710 с.
14. Зотов М.Г. Многокритериальное конструирование систем автоматического управления.— М.: БИНОМ.

Лаборатория знаний, 2004.– 375 с.

15. Солодовников В.В., Филимонов Н.Б. Динамическое качество систем автоматического регулирования, уч. пособие. — М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1987, – 84 с.

16. Соболев И. М., Статников Р. Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. — М.: Наука, 1981. 156 с.

17. Statnikov R., Matusov J. Multicriteria Analysis in Engineering. Springer-Science. 2002 , 262 p.

18. Кормилкин А.А., Тягунов О.А. Многокритериальный выбор параметров регуляторов для линейных систем управления // Мехатроника, автоматизация, управление. № 3, 2007. –с.13-18.

19. Тягунов О.А., Деркач В.В. Задача многокритериальной настройки параметров регуляторов // Информационно-измерительные и управляющие системы. № 5, т.5, 2007.—с. 5-13.

20. Тягунов О.А. Выбор показателей качества при многокритериальной настройке параметров систем управления // Мехатроника, автоматизация, управление. № 4, 2008.– с. 12-16.

21. Тягунов О.А. Развитие технологий анализа, многокритериальной оптимизации и моделирования многосвязных мехатронных систем управления // автореф. дисс. докт. техн. наук. – М.: МИРЭА, 2009, 38 с.

22. Евстигнеев Д.В., Кормилкин А.А., Тягунов О.А. Программный комплекс для моделирования и исследования систем автоматического управления // Мехатроника, автоматизация, управление. № 6, 2007.—с. 41-45.

23. Рыков А.С. Методы и модели системного анализа: принятие решений и оптимизация.— М.: МИСИС, 2005. – 254 с.

24. Погорелов Д.Ю., Михеев Г.В., Ковалев Р.В., Агапов Д.Г. Моделирование динамики колесных и гусеничных роботов в реальном времени с использованием программного комплекса «Универсальный механизм» // Труды XXI Международной научно-технической конференции "Экстремальная робототехника 2010". - Санкт-Петербург: Изд-во "Политехника-сервис", 2010. - С. 180-186.

References

1. Iagnemma K., Dubowsky S. Mobile Robots in Rough Terrain. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2004, 110 p.

2. Lamon P. 3D- position Tracking and Control for All-Terrain Robots. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2008, 104 p.

3. Burdakov S.F., Miroshnik I.V., Stel'makov R.E. Sistemy upravleniya dvizheniem kolesnyh robotov.–SPb.: Nauka, 2001. –227 s.

4. Martynenko YU.G. Upravlenie dvizheniem mobil'nyh kolesnyh robotov // Fundamental'naya i prikladnaya matematika. M.: Izd_vo MGU, 2005. T. 11. Vyp. 8. s. 29–80.

5. Emel'yanov S.N., Platonov A.K., YAroshevskij V.S. Sistema upravleniya polnoprivodnogo trekhkolesnogo dvizhitelya // Mobil'nye roboty i mekhatronnye sistemy. M.: Izd_vo MGU, 2000. S. 89–99.

6. Zabavnikov N.A. Osnovy teorii transportnyh gusenichnyh mashin.— М.: Mashinostroenie, 1975.-448 s.

7. Platonov V.F., Leishvili G.R. Gusenichnye i kolesnye transportno-tyagovye mashiny.– М.: Mashinostroenie, 1986.–296 s.

8. Vong Dzh. Teoriya nazemnyh transportnyh sredstv. – М.: Mashinostroenie, 1982.- 284 s.

9. Krutov V.I. Avtomaticheskoe regulirovanie dvigatelej vnutrennego sgoraniya. —М.: Mashinostroenie, 1979.—с. 615.

10. Kim D.P. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya, t. 1.— М.: Fizmatlit, 2003.- 250 s.

11. Суркин YA.Z. Osnovy teorii avtomaticheskikh sistem.— М.: Nauka, 1977.-468 s.

12. Letov A.M. Dinamika poleta i upravlenie.— М.: Nauka, 1969. 258 s.

13. Fel'dbaum A.A. Elektricheskie sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya.— М.: Oborongiz, 1957. 710 s.

14. Zotov M.G. Mnogokriterial'noe konstruirovaniye sistem avtomaticheskogo upravleniya.— М.: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2004.– 375 s.

15. Solodovnikov V.V., Filimonov N.B. Dinamicheskoe kachestvo sistem avtomaticheskogo regulirovaniya, uch. posobie. — М.: MVTU im. N.E. Baumana, 1987, – 84 s.

16. Sobol' I. M., Statnikov R. B. Vybora optimal'nyh parametrov v zadachah so mnogimi kriteriyami. — М.: Nauka, 1981. 156 s.

17. Statnikov R., Matusov J. Multicriteria Analysis in Engineering. Springer-Science. 2002 , 262 p.

18. Kormilkin A.A., Tyagunov O.A. Mnogokriterial'nyj vybor parametrov regulyatorov dlya linejnyh sistem upravleniya // Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie. № 3, 2007. –с.13-18.

19. Tyagunov O.A., Derkach V.V. Zadacha mnogokriterial'noj nastrojki parametrov regulyatorov // Informacionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy. № 5, t.5, 2007.—ss. 5-13.
20. Tyagunov O.A. Vybory pokazatelej kachestva pri mnogokriterial'noj nastrojke parametrov sistem upravleniya // Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. № 4, 2008.— ss. 12-16.
21. Tyagunov O.A. Razvitiye tekhnologij analiza, mnogokriterial'noj optimizatsii i modelirovaniya mnogosvyaznyh mekhatronnyh sistem upravleniya // avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk. – M.: MIREA, 2009, 38 s.
22. Evstigneev D.V., Kormilkin A.A., Tyagunov O.A. Programmnyj kompleks dlya modelirovaniya i issledovaniya sistem avtomaticheskogo upravleniya // Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. № 6, 2007.—ss. 41-45.
23. Rykov A.S. Metody i modeli sistemnogo analiza: prinyatie reshenij i optimizatsiya.— M.: MISIS, 2005. – 254 s.
24. Pogorelov D.YU., Miheev G.V., Kovalev R.V., Agapov D.G. Modelirovanie dinamiki kolesnyh i gusenichnyh robotov v real'nom vremeni s ispol'zovaniem programmnoho kompleksa «Universal'nyj mekhanizm» // Trudy XXI Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii "Ekstremal'naya robototekhnika 2010". - Sankt-Peterburg: Izd-vo "Politehnika-servis", 2010. - C. 180-186.